

Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 537.226.4
ГРНТИ 29.19.35
Инв. №

УТВЕРЖДЕНО:

Исполнитель:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Уральский
федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина»

От имени Руководителя организации

_____/_____/_____
М.П.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 3 этапа Государственного контракта
№ П870 от 18 августа 2009 г. и Дополнению № 1/П870 от 25 марта 2010 г., Дополнению № 2 от
27 июля 2010 г., Дополнению № 3 от 14 марта 2011 г.

Исполнитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина»

Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-
педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации
мероприятия № 1.2.1 Проведение научных исследований научными группами под руководством
докторов наук.

Проект: Развитие методов доменной инженерии для формирования прецизионных
периодических микро- и нанодоменных структур в сегнетоэлектриках и разработка
преобразователей длины волны лазерного излучения на их основе

Руководитель проекта:

_____/Шур Владимир Яковлевич
(подпись)

Екатеринбург
2011 г.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

по Государственному контракту П870 от 18 августа 2009 на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Руководитель темы:

доктор физико-математических наук, профессор	_____ Шур В. Я.
	подпись, дата

Исполнители темы:

кандидат физико-математических наук, без ученого звания	_____ Батурин И. С.
	подпись, дата

кандидат физико-математических наук, без ученого звания	_____ Кузнецов Д. К.
	подпись, дата

кандидат физико-математических наук, без ученого звания	_____ Лобов А. И.
	подпись, дата

кандидат физико-математических наук, без ученого звания	_____ Шишкина Е. В.
	подпись, дата

кандидат физико-математических наук, без ученого звания	_____ Пелегов Д. В.
	подпись, дата

кандидат физико-математических наук, без ученого звания	_____ Зеленовский П. С.
	подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания	_____ Долбилов М. А.
	подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Иевлев А. В.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Аликин Д. О.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Сарманова М. Ф.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Мингалиев Е. А.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Шихова В. А.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Ахматханов А. Р.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Пряхина В. И.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Торопов В. С.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Подольный С. А.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Небогатилов М. С.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Якунина Е. М.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Зорихин Д. В.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Конев М. В.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Чезганов Д. С.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Карпов Д. А.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Савельев А. П.
подпись, дата

без ученой степени, без
ученого звания

_____ Расковалов А. В.
подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчет 84 с., 4 ч., 35 рис., 5 табл., 43 источн., 1 прил.

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ , ДОМЕННАЯ ИНЖЕНЕРИЯ , ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ , ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА , КОНФОКАЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ , НАНОДОМЕНЫ , НИОБАТ ЛИТИЯ , ТАНТАЛАТ ЛИТИЯ , ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 3 этапу Государственного контракта № П870 "Развитие методов доменной инженерии для формирования прецизионных периодических микро- и нанодоменных структур в сегнетоэлектриках и разработка преобразователей длины волны лазерного излучения на их основе" (шифр "НК-82П") от 18 августа 2009 по направлению "Приборостроение, основанное на новых физических принципах" в рамках мероприятия 1.2.1 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы - Развитие методов доменной инженерии для формирования прецизионных периодических микро- и нанодоменных структур в сегнетоэлектриках и разработка преобразователей длины волны лазерного излучения на их основе

Для экспериментального исследования формирования прецизионных доменных структур и кинетики микро- и нанодоменов были использованы методы визуализации доменов с высоким пространственным разрешением. Среди них особое место занимают оригинальные методы визуализации доменов в объеме монокристаллов с помощью сканирующей лазерной конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния, что позволило получить информацию о кинетике доменов и эволюции нанодоменной структуры.

Использовалось современное оборудование Уральского центра коллективного пользования "Современные нанотехнологии" Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина.

1. Проведен анализ современного состояния научно-технической информации, связанной с разработкой преобразователей длины волны лазерного излучения на основе кристаллов ниобата лития и танталата лития с периодической доменной структурой. Сформулированы требуемые функциональные характеристики нелинейно-оптических преобразователей длины волны лазерного излучения для существующей и перспективной элементной базы современного приборостроения.

2. Созданы автоматизированная установка и программное обеспечение для проведения измерений основных характеристик элементов для преобразования длины волны лазерного излучения. Разработаны и апробированы методики измерения основных характеристик преобразователей: пространственной однородности эффективности преобразования и температуры синхронизма.
3. Изготовлены два экспериментальных макета преобразователей длины волны лазерного излучения и измерены их основные характеристики. На основе установленного влияния условий формирования доменной структуры на основные рабочие характеристики преобразователей доработаны технологические приемы.
4. Проведен анализ и систематизация полученных результатов по созданию доменной структуры приложением электрического поля с использованием импульсного лазерного облучения и быстрого нагрева. Детальное исследование формирования микро- и нанодоменных структур под действием пироэлектрического поля при охлаждении после неоднородного импульсного нагрева позволило заложить основы для создания технологий изготовления регулярных нанодоменных структур. Последующее приложение электрического поля позволяет изготавливать прецизионные периодические доменные структуры в монокристаллах ниобата лития.
5. Проведен анализ возможностей применения периодических доменных структур и определена оптимальная номенклатура нелинейно-оптических преобразователей длины волны излучения с периодической доменной структурой для построения приборов на новых физических принципах.
6. Разработаны и представлены рекомендации по возможности использования результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики.
7. Представлены рекомендации по использованию результатов НИР при разработке научно-образовательных курсов.
8. По результатам исследований отчетного этапа: 1) защищена диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук, 2) представлена к защите диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук, 3) защищены 6 дипломных работ, 4) опубликованы 2 статьи, 5) приняты в печать 3 статьи, 6) представлено 26 докладов на 4х конференциях – двух международных и двух Всероссийских.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1. АННОТИРОВАННАЯ СПРАВКА ПО НАУЧНЫМ РЕЗУЛЬТАТАМ НИР, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ЭТАПАХ № 1 и № 2 ПРОЕКТА.	11
2. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ О ПРОВЕДЕНИИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	15
2.1. АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ПРЕДМЕТ ТРЕБУЕМЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ И ПЕРСПЕКТИВНОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ СОВРЕМЕННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ.....	15
3. ОТЧЕТ ПО ОБОБЩЕНИЮ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	31
3.1. АНАЛИЗ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО СОЗДАНИЮ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИЛОЖЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ И БЫСТРОГО СВЕТОВОГО НАГРЕВА.	31
3.1.1. НАГРЕВ ПРОПУСКАНИЕМ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ВДОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОДА, НАНЕСЕННОГО НА ПОЛЯРНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ	33
3.1.2. ОБЛУЧЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.....	34
3.1.3. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР, ИНДУЦИРОВАННЫХ ИК ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ, В НИОБАТЕ ЛИТИЯ, ЛЕГИРОВАННОМ MgO	41
3.2. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ НОМЕНКЛАТУРЫ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРИБОРОВ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ.	42
3.3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕДЕННЫХ НИР В РЕАЛЬНОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ.....	49
3.4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР ПРИ РАЗРАБОТКЕ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ КУРСОВ.	50
4. СПИСОК СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ И ПРИНЯТЫХ В ПЕЧАТЬ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРЕТЬЕГО ЭТАПА.	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	52
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	55

Введение

В последние годы, стремительно развивается микро- и нано-доменная инженерия как новая ветвь науки и технологии, связанная с созданием стабильных доменных структур с заданными параметрами в коммерчески доступных сегнетоэлектрических кристаллах. Искусственная периодическая доменная структура с определенными параметрами позволяет качественно изменить нелинейно-оптические и электрооптические свойства кристаллов, использовать их для создания новых типов устройств. Изготовление нелинейно-оптических кристаллов с периодической доменной структурой сделало возможным создание разнообразных когерентных источников света, использующих преобразование частоты излучения на основе использования эффекта квазифазового синхронизма. В этом случае для получения высокой эффективности преобразования необходимо создавать прецизионную периодическую доменную структуру с отклонением периода от среднего значения не более чем на 20 нм. Все вышесказанное демонстрирует актуальность проводимых работ.

Целью работы является развитие методов доменной инженерии для формирования прецизионных периодических микро- и нанодоменных структур в сегнетоэлектриках и разработка преобразователей длины волны лазерного излучения на их основе.

Наиболее популярными материалами доменной инженерии являются монокристаллы ниобата лития LiNbO_3 (LN) и танталата лития LiTaO_3 (LT), обладающие большими электрооптическими и нелинейно-оптическими коэффициентами. Кристаллы LN и LT, легированные MgO, обладают высокой стойкостью к оптическому повреждению, что позволяет получать на их основе источники лазерного излучения со средней мощностью до 10 Вт.

В настоящее время существует общественная потребность в доступных (недорогих) источниках видимого излучения для формирования цифрового изображения, биомедицинских применений, полупроводникового производства и хранения данных. Одним из путей удовлетворения указанной потребности может быть создание технологии изготовления оптических элементов, преобразующих длину волны излучения доступных эффективных инфракрасных твердотельных и полупроводниковых лазеров методом генерации второй гармоники. Для решения указанных проблем могут быть использованы элементы на основе монокристаллов LN и LT с прецизионной периодической доменной структурой, воспроизводимой с нанометрической точностью. В настоящее время освоено

промышленное выращивание кристаллов LN и LT оптического качества и большого диаметра.

На третьем этапе проведены следующие запланированные исследования:

1. Анализ научно-технической информации на предмет требуемых функциональных характеристик нелинейно-оптических преобразователей для существующей и перспективной элементной базы современного приборостроения.

2. Разработка и апробация методик измерения основных характеристик преобразователей длины волны лазерного излучения. Создание установки для проведения измерений основных характеристик.

3. Изготовление экспериментальных макетов преобразователей длины волны лазерного излучения и измерение их основных характеристик. Доработка технологических приемов изготовления преобразователей на основе установления влияния условий формирования доменной структуры на основные рабочие характеристики преобразователей.

4. Анализ и систематизация полученных результатов по созданию доменной структуры приложением электрического поля с использованием импульсного лазерного облучения и быстрого светового нагрева.

5. Анализ возможностей применения периодических доменных структур и определение оптимальной номенклатуры нелинейно-оптических преобразователей длины волны излучения для построения приборов на новых физических принципах.

6. Обобщение и оценка результатов исследований по проблеме.

7. Выработка рекомендаций по возможности использования результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики.

8. Разработка рекомендаций по использованию результатов НИР при разработке научно-образовательных курсов.

9. Публикация результатов исследований и составление итогового научно-технического отчета о выполнении Государственного контракта.

Получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ современного состояния научно-технической информации, связанной с разработкой преобразователей длины волны лазерного излучения на основе кристаллов ниобата лития и танталата лития с периодической доменной структурой.

2. Созданы автоматизированная установка и программное обеспечение для проведения измерений основных характеристик элементов для преобразования длины волны лазерного излучения.

3. Изготовлены два экспериментальных макета преобразователей длины волны лазерного излучения и измерены их основные характеристики. Доработаны технологические приемы.

4. Проведен анализ и систематизация полученных результатов по созданию доменной структуры приложением электрического поля с использованием импульсного лазерного облучения и быстрого нагрева.

5. Проведен анализ возможностей применения периодических доменных структур и определена оптимальная номенклатура нелинейно-оптических преобразователей длины волны излучения с периодической доменной структурой для построения приборов на новых физических принципах.

6. Разработаны и представлены рекомендации по возможности использования результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики.

7. Представлены рекомендации по использованию результатов НИР при разработке научно-образовательных курсов.

Полученные результаты заложат фундаментальные основы технологии формирования в монокристаллах LN и LT прецизионных стабильных доменных структур с нанометровой точностью воспроизведения микронных и субмикронных периодов для создания оптических элементов с высокой эффективностью преобразования лазерного излучения.

1. Аннотированная справка по научным результатам НИР, выполненных на этапах № 1 и № 2 проекта.

На первом этапе были выполнены следующие основные работы:

1. Анализ существующей литературы по воздействию импульсного лазерного излучения на монокристаллы ниобата лития и танталата лития. Составление аналитического обзора.
2. Выбор и обоснование оптимального варианта направления исследований. Физическое обоснование используемых методов формирования прецизионной доменной структуры с использованием импульсного облучения и приложения электрического поля.
3. Составление плана проведения экспериментальных и теоретических исследований.
4. Изучение формирования микро- и нанодоменных структур при пространственно неоднородном импульсном нагреве лазерным излучением в монокристаллах ниобата лития и танталата лития.
5. Изучение формирования микро- и нанодоменных структур в монокристаллах ниобата лития и танталата лития с поверхностным слоем, модифицированным методами протонного обмена.
6. Изучение формирования микро- и нанодоменных структур в монокристаллах ниобата лития и танталата лития с поверхностным слоем, модифицированным методом ионной имплантации.
7. Экспериментальное исследование образования периодической доменной структуры в результате импульсного лазерного облучения поверхности пластин с периодическими аппликациями, созданными методами фотолитографии.
8. Компьютерное моделирование формирования периодической доменной структуры в результате неоднородного импульсного лазерного облучения.
9. Сопоставление результатов эксперимента и компьютерного моделирования.

Для экспериментального исследования формирования прецизионных доменных структур и кинетики микро- и нанодоменов были использованы методы визуализации доменов с высоким пространственным разрешением. Среди них особое место занимают оригинальные методы визуализации доменов в объеме монокристаллов с помощью сканирующей лазерной конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния, что

позволило получить информацию о кинетике доменов и эволюции нанодоменной структуры.

На основании проведенных исследований были сформулированы **следующие основные результаты:**

1. Аналитический обзор литературы по воздействию лазерного излучения на свойства монокристаллов ниобата лития и танталата лития.
 2. Обоснование оптимального варианта направления исследований и используемых методов формирования прецизионной доменной структуры с использованием импульсного облучения и приложения электрического поля. План проведения исследований.
 3. Модель, описывающая формирование микро- и нанодоменных структур в монокристаллах ниобата лития и танталата лития при пространственно неоднородном импульсном нагреве лазерным излучением.
 4. Механизм формирования микро- и нанодоменных структур в монокристаллах ниобата лития и танталата лития с поверхностным слоем, модифицированным методами протонного обмена и ионной имплантации.
 5. Модель формирования периодической доменной структуры в результате импульсного лазерного облучения поверхности пластин с периодическими аппликациями, созданными методами фотолитографии, справедливость которой подтверждена сопоставлением результатов эксперимента и компьютерного моделирования.
 6. Методы формирования прецизионной доменной структуры с использованием приложения электрического поля, импульсного облучения и модификации поверхностного слоя протонным обменом и ионной имплантацией в конгруэнтных, стехиометрических и легированных монокристаллах ниобата лития и танталата лития.
- Все поставленные задачи этапа решены в полном объеме, что позволило достигнуть целей первого этапа проекта.

По результатам исследований были подготовлены и приняты в печать одна коллективная монография и семь статей, представлено 28 докладов на четырех конференциях – трех Международных и одной Всероссийской.

В ходе выполнения работ по первому этапу коллектив исполнителей явился организатором Третьего международного симпозиума «Микро- и нано-доменные структуры в сегнетоэлектриках» (ISDS'09) по тематике проекта, который проводился в

Уральском государственном университете им. А.М. Горького 13-18 сентября 2009 г. В рамках симпозиума был проведен семинар «Нанотехнологии: современное оборудование, координация, центры коллективного пользования» и выставка «Оборудование для нанотехнологий», в которой приняли участие представители 10 ведущих российских и зарубежных компаний.

Также коллектив исполнителей участвовал в выставке, которая проводилась в рамках Второго Международного форума по нанотехнологиям РОСНАНО, 6-8 октября 2009, Москва.

На втором этапе были выполнены следующие основные работы:

1. Разработка методик создания периодических микро- и нанодоменных структур в конгруэнтных, стехиометрических и легированных MgO монокристаллах ниобата лития и танталата лития с использованием результатов, полученных на первом этапе.
2. Создание экспериментальных установок для реализации методов формирования периодической доменной структуры при воздействии импульсного лазерного излучения и электрического поля.
3. Выбор материала для термостойкой структуры электродов. Разработка и апробация методов нанесения структуры периодических электродов с использованием фотолинтографии.
4. Изготовление опытных образцов прецизионных периодических доменных структур.
5. Разработка и апробация методов измерения параметров периодических доменных структур методами высокого разрешения.
6. Разработка и апробация методов улучшения пространственной однородности периодической доменной структуры.

Для экспериментального исследования формирования прецизионных доменных структур и кинетики микро- и нанодоменов были использованы методы визуализации доменов с высоким пространственным разрешением. Среди них особое место занимают оригинальные методы визуализации доменов в объеме монокристаллов с помощью сканирующей лазерной конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния, что позволило получить информацию о кинетике доменов и эволюции нанодоменной структуры.

На основании проведенных исследований были сформулированы **следующие** основные результаты:

На основании модели, описывающей формирование микро- и нанодоменных структур в монокристаллах ниобата лития при пространственно неоднородном импульсном нагреве лазерным излучением, а также в результате импульсного лазерного облучения поверхности пластин с периодическими аппликациями, созданными методами фотолитографии разработана оригинальная методика создания прецизионной доменной структуры в ниобате лития, легированном магнием $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ ($\text{MgO}:\text{LN}$), состоящая из четырех основных технологических операций: (1) тестирования однородности пластины, (2) нанесения периодических электродов, (3) облучения пластин интенсивным импульсным лазерным излучением, (4) приложения электрического поля. Сформулированы основные требования к электродной структуре, используемой для формирования периодической доменной структуры при импульсном лазерном воздействии, проведены эксперименты по использованию различных металлов для создания электродов, разработаны и апробированы методики удаления электродной структуры, изучения состояния поверхности и визуализации доменной структуры после импульсного лазерного облучения. Апробированы методы нанесения структуры периодических электродов с использованием фотолитографии.

Изготовлены опытные образцы, представляющие собой пластины ниобата лития с периодической доменной структурой. Паспорта двух опытных образцов, содержащие (1) изображения доменной структуры, полученные методами оптической и сканирующей зондовой микроскопии, (2) параметры структуры, полученные статистической обработкой изображений, и (3) условия создания доменной структуры.

Разработаны и апробированы методы проведения аттестации образцов с периодической доменной структурой основанный на визуализации доменной структуры с использованием различных типов микроскопии высокого разрешения и статистического анализа полученных изображений с целью получения данных об основных геометрических параметрах структуры.

Разработаны методы улучшения пространственной однородности периодической доменной структуры за счет подбора основных параметров процесса переключения: режима приложения электрического поля, длительности и амплитуды импульсов, частоты следования и количества импульсов. Причем параметры импульсов могут варьироваться в ходе процесса.

Таким образом, индивидуальный подбор параметров облучения поверхности пластины импульсами ИК лазерного облучения, параметров сканирования а также подбор

амплитуды, длительности и частоты импульсов последующего приложения электрического поля позволяют повысить однородность формируемых доменных структур. При этом появляется возможность создания прецизионной структуры, даже при использовании пространственно неоднородных исходных пластин LN.

По результатам исследований на втором этапе были опубликованы девять статей, представлено 24 доклада на пяти конференциях – трех Международных и двух Всероссийских.

2. Аналитический отчет о проведении теоретических и экспериментальных исследований

2.1. Анализ научно-технической информации на предмет требуемых функциональных характеристик нелинейно-оптических преобразователей для существующей и перспективной элементной базы современного приборостроения.

Одним из наиболее актуальных современных применений периодических доменных структур в сегнетоэлектриках является создание высокоэффективных нелинейно-оптических преобразователей частоты лазерного излучения. Для таких применений используются монокристаллы ниобата лития с регулярной прецизионной микродоменной структурой с периодом в диапазоне от 4 до 30 мкм. Так, для эффективной генерации второй гармоники (ГВГ) в сине-зеленой части оптического спектра (длины волн от 450 до 540 нм) из инфракрасного (ИК) излучения (с длинами волн 900-1080 нм) необходимы периоды от 4 до 7 мкм.

Следует отметить, что в виду сильной зависимости рабочей температуры элемента ГВГ от периода, точность задания и пространственная однородность периода доменной структуры должна быть не хуже 10-20 нм. В настоящее время, наиболее перспективным методом создания прецизионных периодических доменных структур с заданными параметрами является послеростовая обработка монодоменных пластин ниобата лития приложением электрического поля к системе периодических электродов, изготовленных с помощью фотолитографии.

Для эффективного нелинейно-оптического преобразования длины волны лазерного излучения необходимо выполнять условие фазового синхронизма – равенство фазовых

скоростей излучения накачки и преобразованного излучения. Невысокие значения нелинейно-оптических коэффициентов и наличие углового апертурного эффекта при использовании обычных кристаллов с синхронизмом за счет двупреломления приводят к низкой эффективности преобразования и к ухудшению качества пучка [1]. Фазовый квазисинхронизм с применением кристаллов, имеющих периодическую модуляцию квадратичной восприимчивости [2], позволяет существенно увеличить эффективность преобразования за счет использования более высоких значений нелинейной восприимчивости кристаллов.

Эффект фазового квазисинхронизма может быть использован для различных нелинейно-оптических преобразований: генерации гармоник [1,3], генерации суммарных или разностных частот [4], а также оптической параметрической генерации [5,6]. В работе [2] авторами представлен обзор основных идей практического использования данного эффекта. Наиболее эффективным решением является периодическое изменение знака нелинейной восприимчивости.

Наиболее часто используемым и наглядным является использование эффекта для генерации второй гармоники. В приближении плоской монохроматической волны (частота ω_1) в кристалле с квадратичной восприимчивостью d будет генерироваться волна с частотой $2\omega_1$. При этом при распространении в кристалле между этими волнами будет образовываться сдвиг фаз, который достигнет величины π на расстоянии, называемом длиной синхронизма l_c [2].

$$l_c = \lambda / 4(n_2 - n_1), \quad (1)$$

где λ - длина исходной волны, n_2 и n_1 - показатели преломления генерируемой и исходной волны, соответственно.

Перекачка энергии между двумя волнами определяется сдвигом фаз между ними, следовательно при периодической смене знака квадратичной восприимчивости с периодом равным l_c можно достичь эффективной генерации второй гармоники (рис. 1).

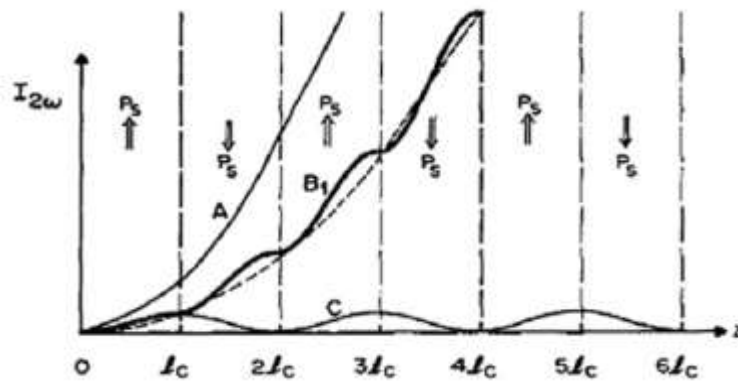


Рисунок 1. Зависимость интенсивности излучения второй гармоники от расстояния при различных режимах синхронизма: (А) идеальный фазовый синхронизм; (В) фазовый квазисинхронизм; (С) отсутствие синхронизма [2].

Так как фазовый квазисинхронизм не основан на двупреломлении, то имеется возможность выбора произвольных направлений поляризации двух волн, в частности оптимальным является их направление вдоль полярной оси кристалла. Так можно использовать максимальное значение нелинейной восприимчивости d_{33} и избежать сноса пучка.

В приближении плоской волны и отсутствия истощения исходной волны аналитически полученное выражение для интенсивности второй гармоники [7] может быть использовано для анализа влияния параметров структуры на эффективность преобразования [8].

Кроме прочих факторов эффективность преобразования пропорциональна $\text{sinc}^2(\Delta k L/2)$, где Δk – расхождение фазовых векторов, а L – длина кристалла (длина взаимодействия). Для установления зависимости эффективности от отклонений параметров был использован тот факт, что значение $\Delta k L/2 = 0.4429\pi$ приводит к уменьшению эффективности вдвое.

Согласно [8] ошибка значения периода Λ не должна превышать $\delta\Lambda = 1.77 \Lambda/N$ (здесь и далее все выражения рассмотрены для квазисинхронизма первого порядка), где N – число периодов. В частности, при длине кристалла 10 мм и периоде около 7 мкм в ниобате лития при генерации зеленого излучения постоянная ошибка периода не должна превышать 8 нм.

Спектральная полуширина $\delta\lambda$ эффективного преобразования зависит от дисперсии показателя преломления [8]:

$$\delta\lambda = \frac{0.4429\lambda}{L} \left| \frac{n_2 - n_1}{\lambda} + \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} - \frac{1}{2} \frac{\partial n_2}{\partial \lambda} \right|^{-1}, \quad (2)$$

Зависимости показателя преломления от температуры и длины волны обычно задаются эмпирическими уравнениями Селмайера [9-17]. Для ниобата лития типичным является значение спектральной полуширины $\delta\lambda = 2$ нм для длины кристалла 1 мм (для длины волны 1064 нм) [8]. При увеличении длины кристалла, в соответствии с (2) спектральная полуширина уменьшается обратно пропорционально длине. Однако, кристаллы такой длины используются как правило для преобразования излучения лазеров, работающих в импульсном режиме с длительностью импульса менее 1 нс. Для большей длительности импульсов и для преобразования непрерывного излучения используют более длинные кристаллы – до 50 мм. При этом существенно ужесточаются требования к спектральной ширине излучения накачки (рис. 2).

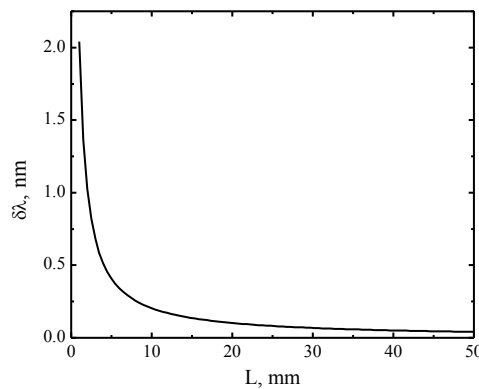


Рисунок 2. Зависимость спектральной полуширины от длины кристалла.

Также в работах [2,8] рассмотрены вопросы влияния неидеальности периодической структуры на эффективность преобразования. Пропущенные периоды (периоды, в которых знак нелинейной восприимчивости является противоположным требуемому) оказывают существенное влияние на эффективность, которая пропорциональна $(1 - 2f)^2$, где f – доля пропущенных периодов. Так, пропуск 5% периодов ведет к уменьшению эффективности до 81% от величины эффективности на идеальной структуре.

Также рассмотрено влияние случайных ошибок расположения отдельных доменов и отношения ширины доменов к периоду (скважность). Было показано, что

$$\eta \approx \exp(-\pi^2 \sigma_l^2 / 2l_c^2) \text{ для зависимости от скважности} \quad (3)$$

$$\langle \eta \rangle \approx 1 - \frac{\pi^2}{6} N \frac{\sigma_l^2}{l_c^2} \text{ для зависимости от ошибки периода,} \quad (4)$$

где σ_l – дисперсия длин доменов.

Таким образом, возможные отклонения не должны превышать следующих значений: $\sigma_l/l_c < 0.375$ и $\sigma_l/l_c < 0.72/\sqrt{N}$. Ошибка скважности не является критичной, так отклонения на 30% приводят к уменьшению эффективности менее чем на 50%, в то время как отклонения периода приводят к накоплению рассогласования по длине кристалла и существенному уменьшению эффективности. Например, для кристалла длиной 10 мм и периодом доменов 7 мкм дисперсия размеров не должна превышать 130 нм, а для 50 мм – 60 нм.

Несмотря на то, что идея применения периодической модуляции квадратичной нелинейности была высказана на заре развития лазерной физики [18], практическое применение она получила только в 90-х годах XX века, когда были разработаны методы формирования периодической доменной структуры в сегнетоэлектрических материалах.

Среди большого количества нелинейно-оптических сегнетоэлектриков оптимальными для применения являются монокристаллы семейства ниобата лития (LiNbO_3 , LN) и танталата лития (LiTaO_3 , LT) [1]. Эти кристаллы в настоящее время выращиваются в больших объемах и большого размера (доступны пластины диаметром от 2 до 5 дюймов). Они имеют высокие нелинейно-оптические коэффициенты 16 пм/В (танталат лития) и 28 пм/В (ниобат лития) и оптически прозрачны в спектральном диапазоне от 320-370 нм до 4-5 мкм [2].

Одной из проблем является наличие фотоиндуцированных эффектов, таких как фоторефракция [19] и индуцированное второй гармоникой поглощение ИК излучения (GRIPA) [20]. Частично эти эффекты можно нейтрализовать, повысив рабочую температуру более 150°C, что неудобно для реальных применений. Было показано, что легирование MgO и получение кристаллов LN и LT с составом, близким к стехиометрическому, позволяет эффективно подавить фотоиндуцированные эффекты [21,22], что открыло новые возможности применения данных кристаллов для генерации излучения высокой мощности, особенно для волоконных лазеров.

Основным преимуществом волоконных лазеров [23] перед объемными твердотельными лазерами, являются широкие возможности масштабирования мощности излучения при сохранении высокого качества пучка (дифракционно-ограниченного). В

первую очередь в этом волоконные лазеры обязаны специфической геометрии - соотношение поверхности к объему намного больше, чем в объемных лазерных кристаллах, что снимает проблемы с диссипацией тепла.

Волоконные лазеры имеют высокий коэффициент преобразования, так как волокно позволяет локализовать излучение в очень маленьком диаметре на большом расстоянии, что приводит к высокой плотности излучения. В объемных лазерах фокусировка излучения вызывает соответствующее уменьшение конфокального параметра, определяющее длину взаимодействия.

Использование одномодового ядра волокна позволяет получать практически дифракционно-ограниченный пучок, так как длинное волокно играет роль естественного почти идеального пространственного фильтра, эффективно отфильтровывающего все лишние пространственные частоты.

Высокая эффективность поглощения накачки и большая длина рабочей области приводит к большому коэффициенту усиления при малых потерях, что позволяет эффективно использовать не только основные линии переходов, но также и малоинтенсивные.

Основные преимущества волоконных лазеров:

- Высокая эффективность преобразования электрической энергии излучения.
- Очень высокое качество выходного пучка.
- Стабильность.
- Длительный срок службы.
- Технологичность.
- Масштабируемость по мощности за счет объединения выходного излучения отдельных лазерных элементов.

Мощные импульсные объемные лазеры с модуляцией добротности имеют низкое качество пучка (до 10 раз от дифракционно-ограниченного). Поэтому применение одномодовых волоконных лазеров для генерации второй гармоники в сине-зеленом диапазоне является важной и перспективной задачей, благодаря высокому качеству пучка и соответственно более высокой эффективности преобразования во вторую гармонику.

Необходимым требованием для эффективной генерации второй гармоники является узкая ширина спектральной линии лазера, однако мощные импульсные волоконные лазерные осцилляторы обычно генерируют излучение с большой спектральной шириной за

счет естественно широкой полосы усиления и неоднородного уширения линии за счет свойств среды. Без специальных мер, спектральная ширина может составлять десятки нанометров, что не приемлемо для удвоения частоты. Также в лазерах высокой мощности наблюдаются нелинейные эффекты, которые могут привести к уширению линии и нестабильности излучения [24].

В работе, опубликованной сотрудниками компании IPG [25], одномодовый Yb волоконный лазер с длиной волны 1118 нм использовался для накачки короткой волоконной резонаторной полости (волокно, поддерживающее поляризацию) для Рамановской генерации 23 Вт непрерывного излучения на длине волны 1179 нм и полушириной 0.4 нм. Удвоение полученного излучения в периодически поляризованном MgO:LN, позволило получить источник зеленого света мощностью более 3 Вт. До плотности излучения 2 МВт/см^2 оптического повреждения не наблюдалось. Отмечается, что такой подход может быть использован для получения излучения второй гармоники с мощностью в несколько Вт в диапазоне 560-770 нм за счет генерации непрерывного излучения в диапазоне 1120-1550 нм с помощью Рамановского волоконного лазера, накачиваемого линейно поляризованным Yb волоконным лазером с длиной волны около 1 мкм. Схема эксперимента приведена на рис. 3.

PPMgO:LN элемент был приобретен у компании HC Photonics имел период 9.23 мкм, температуру синхронизма около 130 °C (ширина 3.4 °C) и длину 8 мм. Конфокальная фокусировка, оптимизировалась для получения максимальной выходной мощности (диаметр 40 мкм, конфокальная длина 4.5 мм). Достигнута мощность более 3 Вт (12.3% преобразования). Качество пучка зеленого света было высоким ($M^2 < 1.1$) во всем диапазоне мощностей до плотности 3 МВт/см^2 (120 кВт/см^2 для второй гармоники). Тестирование в течение нескольких дней не выявило каких-либо признаков деградации.

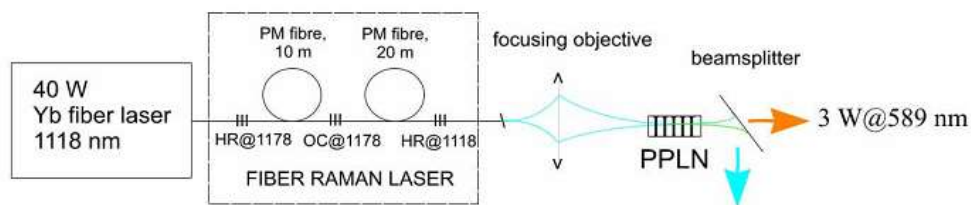


Рисунок 3. Схема генерации непрерывного излучения на дине волны 589 нм на основе волоконного Рамановского лазера, накачиваемого с помощью мощного Yb волоконного лазера [25].

Линейно поляризованный непрерывный узкополосный Yb волоконный лазер с длиной волны 1050 нм был использован для генерации второй гармоники - желтого света с длиной волны 575 нм в работе [26] (Стенфордский университет). Осциллятор излучал 89 мВт непрерывного линейно поляризованного света с возможностью подстройки длины волны в пределах 0.80 нм. Выход волоконного лазера был пристыкован к волноводу в PPLN элементе, который обеспечивал эффективность преобразования в желтый свет 67%. Система была полностью интегрирована, без применения пространственной оптики. Общая оптическая эффективность составила 7%.

Основные преимущества предложенной системы: единственный лазер, без применения внутрирезонаторной генерации, компактность – без пространственной оптики, узкая спектральная ширина – без использования нелинейных эффектов. Отмечается сложность создания лазеров на Yb волоконных лазеров на длине волны более 1120 нм, такие как малое сечение излучения и конкуренция со стороны 1030 нм, где усиление значительно выше (еще более усложняемая из-за низких потерь резонатора). Первая проблема была решена за счет использования волоконных брэгговских решеток, имеющих высокую отражательную способность 23 и 3.4 dB для отражателя и выходного элемента и низкую отражательную способность на длине волны 1030 нм. Вторая проблема решалась вводом в резонатор отрезка сильно легированного Yb, в котором наблюдается сильное поглощение на 1030 нм. Выход волоконного лазера был пристыкован fiber-pigtailed PPLN с волноводом на поверхности, выполненным по технологии обратного протонного обмена. Кристалл с периодической доменной структурой длиной 30 мм. Спектральная ширина кристалла 96 пм, лазера – 40 пм. Температура синхронизма 115.6°C. Мощность, попадающая в волновод, составляла 65 мВт. На максимальной мощности накачки мощность генерации желтого света составляла 40 мВт. Полная оптическая эффективность – 7%. Отмечается, что были замечены признаки фоторефрактивного эффекта после работы в течение нескольких часов, которые можно устранить применением MgO:LN или стехиометрического LiTaO₃.

В работе [27] сообщается о генерации 3 Вт света с длиной волны 542 нм в MgO:LN путем удвоения частоты одномодового линейно поляризованного Yb волоконного лазера мощностью 9 Вт, длиной волны 1084 нм, $M^2=1.05$ и спектральной шириной 0.07 нм. Элементы генерации второй гармоники имели период 7.38 мкм, толщину 1 мм и длину взаимодействия 25 мм. Максимальная эффективность преобразования составила 35%. Выходной пучок имел высокое качество ($M^2=1.1$) и стабильность лучше 1.5%.

В работе [28] (NIMS, Tsukuba, Япония) была показана генерация до 2.06 Вт излучения на длине волны 542 нм в кристалле PPMgO:SLT в простейшей односторонней схеме, показанной на рис. 4. Элементы PP 1% MgO:SLT были получены с приложением электрического поля (электроды - металл поверх рисунка в фоторезисте) в пластине толщиной 0.5 мм и диаметром 2 дюйма. Исследовались элементы с периодом 8.3 и 8.4 мкм длиной 5, 10 и 20 мм. Для всех кристаллов выполнялись условия оптимальной фокусировки $\xi \sim 1/b = 2.8$. Для регулирования мощности использовалась полуволновая пластинка. Образец помещался на Пельтье элемент с контролем температуры с точностью до 0.1°C. Температура фазового квазисинхронизма составила 107 и 57 °C для 8.3 и 8.4 мкм периода, соответственно. Отмечается, что PPSLT отличается увеличенным значением теплопроводности, чем другие сходные материалы. Использовались две линии лазера с длиной волны 1084 нм – с шириной 0.22 нм (11 Вт) и 0.07 нм (2.28 Вт). Исследована зависимость нормированной мощности от длины элемента и спектральной ширины линии лазера. Показано, что для 20 мм образца с $\Delta\lambda = 0.16$ нм имеется насыщение при увеличении длины. Было получено стабильное излучение мощностью 2.06 Вт (19%) для 20 мм образца без каких-либо признаков деградации или нестабильности. Наблюдался сдвиг оптимальной температуры 0.088°C/Вт, то есть наблюдается термическое рассогласование фаз. Максимальная нормированная эффективность составила 3.1%/Вт, однако на основе расчетов утверждается, что уменьшением ширины спектральной линии лазера можно добиться увеличения до 4.1%/Вт.

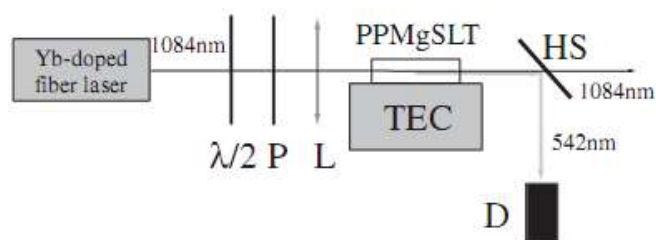


Рисунок 4. Генерация 2 Вт излучения на длине волны 542 нм с помощью удвоения излучения Yb волоконного лазера в кристалле PPMgO:SLT [28].

В более поздней работе [29] те же авторы сообщили о генерации более 16 Вт в MgO:SLT с помощью точного управления разогревом кристалла. На сегодняшний день это рекордное значение. Кристалл помещался в полностью закрытый держатель из теплопроводящего материала для отвода тепла со всех сторон (рис. 5). В данной работе

использовался как Yb волоконный лазер с выходной мощностью 47 Вт (0.07 нм, 1084 нм, $M^2 = 1.0$) и одночастотный одномодовый Nd:YAG лазер с мощностью 100 Вт, длиной волны 1064 нм, разработанный в University of Tokyo ($M^2=1.12$, $\Delta\lambda = 1$ кГц) – на образцах с периодом 8.0 мкм.

В результате исследования показано, что нагрев обусловлен поглощением зеленого излучения, а не ИК и не эффектом GRIIRA. Это приводит к сдвигу оптимальной температуры синхронизма в меньшую сторону (до 3-4 градусов).

Вторая проблема – термическая самофокусировка, которая приводит к сходимости пучка второй гармоники и повреждению образца. Авторы работы наблюдали появление сходимости и таким образом устанавливали предельную мощность зеленого света при разных параметрах фокусировки на разных лазерах. На Yb волоконном лазере и 20 мм образце было показано, что уменьшение конфокального параметра приводит к увеличению предельной мощности, однако дальнейшее уменьшение конфокального параметра бессмысленно для 20 мм образца, поэтому были проведены аналогичные исследования на 10 мм образце с использованием более мощного Nd:YAG лазера. При этом для значения конфокального параметра около 1.3 мм было достигнуто предельное значение второй гармоники в 16 Вт при накачке в 91.5 Вт (17.6%). При накачке более 70 Вт наблюдались признаки насыщения из-за термического рассогласования фаз (thermal dephasing).

Учитывая, что для существуют волоконные лазеры с высоким качеством пучка и возможностью получения узкой спектральной линии, скорее всего, возможно получать аналогичные мощности излучения и с использованием волоконных лазеров.

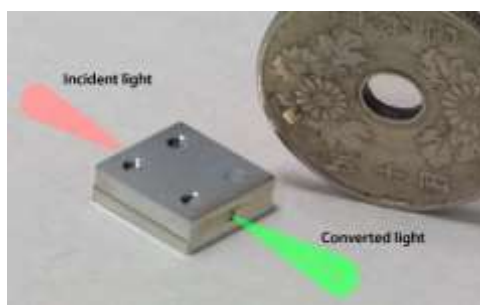


Рисунок 5. Держатель для PPMgO:SLT элемента, на котором было получено рекордное значение мощности генерации второй гармоники [29].

В работе [30], Laser and Optics Research Center, Physics Department, USAF Academy, 2007, анализируются возможности применения элементов с периодической доменной структурой на KTP, MgO:LN и MgO:SLT для генерации второй гармоники непрерывных

волоконных лазеров с длиной волны 1064 нм и мощностью до 10 Вт. Исследования проводились на трех коммерческих образцах периодически поляризованных кристаллов и были разделены на два класса: «маломощные» с мощностью накачки до 3 Вт использовались для определения зависимости от спектральной ширины лазера и дефектов периодических доменных структур, а «мощные» - от 3 до 10 Вт для выяснения эффектов, связанных с термическим рассогласование фаз и истощением накачки. В качестве накачки использовался 10 Ваттный линейно-поляризованный волоконный Yb лазер производства IPG Photonics, имеющий ширину спектральной линии 0.064 нм. В режиме до 3 Вт мощность лазера выставлялась на 3 Вт, а используемая мощность регулировалась с помощью полуволновой пластинки и поляризатора. В режиме от 3 до 10 Вт мощность регулировалась непосредственно в лазере. PPKTP – от Raicol, 1x2x30 мм; PPMgOSLT – HCP Photonics, 1x2.3x30 мм ; 0.5x3x50 PPMgOLN – HCP Photonics. Элемент помещался на медный держатель и на Пельтье для поддержания температуры с точностью до 0.05 °C. Для обеспечения теплового контакта на нижнюю поверхность элемента наносилась теплопроводящая смазка, а сверху он закрывался медной пластинкой. Излучение фокусировалось в элемент с помощью линзы с $f=25$ мм.

Исследования на малых мощностях показали, что экспериментально измеренные полуширины температурной зависимости отличаются в большую сторону ($\sim 20\%$) от расчетных, что, по мнению авторов, свидетельствует о меньшей эффективной длине взаимодействия. Нормированная эффективность ($\%/W$), полученная из зависимости эффективности от мощности накачки (PPKTP - 2.9; MgOSLT – 2.08; MgO:LN – 5.65 $\%/W$), существенно ниже расчетной. В качестве объяснения этому факту авторы учитывают влияние спектральной ширины лазера, которая немного превышает acceptance bandwidth элементов (особенно для MgOLN). Кроме того, было учтено уширение полуширины температурной кривой от конечной спектральной ширины лазера. Возможно, что на эффективную длину (и ширину температурной зависимости) оказывает влияние возможные погрешности периодической доменной структуры. Например, chirp (линейное изменение периода) на 0.09% между соседними периодами (2.5 пм) приводит к уменьшению эффективной длины на 20% и соответствующему уменьшению эффективности. Для MgOLN наблюдаемое различие между экспериментальной и расчетной эффективностью еще больше, что объясняется уширением доменов за пределы половины периода. Для других кристаллов утверждается, что скважность составляет 50%.

Для больших мощностей накачки в РРКТР и РРМgOLN наблюдается сдвиг температурной зависимости в сторону меньших значений, что, по мнению авторов, свидетельствует о поглощении кристаллов и неоднородного повышения их температуры. При мощности накачки выше 5 Вт наблюдаются существенные отклонения от линейной зависимости эффективности от мощности. Это объясняется, в первую очередь, наличием эффекта истощения накачки, однако расчеты показывают, что он приводит к несколько меньшим изменениям. Учет термического рассогласования учитывался с помощью простой модели, описывающей теплоперенос в кристалле при наличии поглощения. Было показано, что с учетом истощения накачки и термического рассогласования удается хорошо описать полученные зависимости. В РРМgOSLT изменения меньше, однако итоговая эффективность в MgOLN существенно выше.

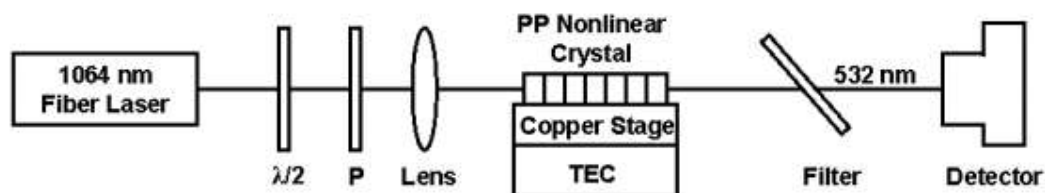


Рисунок 6. Схема установки, использовавшейся в работе [30] для исследования генерации второй гармоники волоконного лазера с помощью элементов с периодической доменной структурой РРКТР, РРМgO:LN, РРМgO:SLT.

В работе [31] (Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Иверсия-файбер, Новосибирск) продемонстрирован волоконный Yb лазер с волоконной брэгговской решеткой в качестве элемента для подстройки длины волны лазера в диапазоне 45 нм с выходной мощностью около 6 Вт. Подстройка осуществлялась с помощью изгиба решетки, причем была разработана конструкция, обеспечивающая одновременный изгиб двух брэгговских решеток. Кроме того, была продемонстрирована схема внутривибраторного удвоения частоты такого лазера на основе кристалла КТР и внешнего резонаторного зеркала с возможностью подстройки длины волны в диапазоне 8 нм. По мнению авторов, преимущество КТР кристалла перед кристаллами с периодическими структурами состоит в возможности изготовления подстраиваемых лазеров и более высокой стойкостью к излучению высокой мощности (что несколько спорно).

Работа [32] (Коллектив авторов из Испании и Швеции, 2008) посвящена генерации зеленого света мощностью до 6.2 Вт с эффективностью до 20% путем удвоения частоты непрерывного Yb волоконного лазера с помощью периодически поляризованного кристалла КТР в наиболее простой компактной однопроходной схеме, изображенной на рис. 6. Для накачки в данной работе использовался серийный непрерывный волоконный лазер компании IPG YLR-30-1064-LP-SF с выходной мощностью 30 Вт одномодового линейно поляризованного излучения с $M^2 < 1.01$ (на сайте IPG для этой серии лазеров указано 1.1) и спектральной шириной 12.5 МГц. Для стабильности работы лазера он включался на полную мощность, в то время, как мощность, подаваемая на элемент для удвоения частоты, менялась с помощью двух полуволновых пластинок и поляризующего делителя пучка. Излучение фокусировалось в перетяжку диаметром 37 мкм (интенсивность $1/e^2$) в центр кристалла ($\xi=1.28$). Периодически поляризованный кристалл flux-grown PPKTP толщиной 1 мм, шириной 6 мм, длиной периодической части 17 мм, периодом 9.01 мкм был изготовлен методом приложения электрического поля к системе электродов (Al поверх рисунка в резисте) и помещен в термостат с точностью поддержания температуры 0.1 °C. Кристалл был покрыт антиотражающим покрытием на основной длине волны (<1%). Измерена температурная зависимость выходной мощности (при накачке в 1 Вт) и получена полуширина $\Delta T = 3$ °C, что немного больше расчетного значения 2.62 °C, из чего сделан вывод о том, что эффективная длина элемента около 15 мм.

Была исследована зависимость выходной мощности зеленого света от входной мощности накачки. Показано, что до входной мощности в 15 Вт зависимость носит квадратичный характер, а на больших мощностях наблюдается только линейный рост с постепенным насыщением эффективности преобразования. Нормированный коэффициент преобразования до 15 Вт – 1.2%/Вт. Максимальная мощность 6.2 Вт при максимальной накачке с эффективностью 20.8%. Насыщение вызвано истощением накачки и термическим рассогласованием фаз за счет GIIRA, двухфотонного нелинейного поглощения и линейного поглощения на обеих длинах волн. Проведенные дополнительные эксперименты показали, что GIIRA и двухфотонное поглощение не являются существенными, таким образом, утверждается, что нагрев элемента связан с обычным поглощением. С учетом поглощения $d_{\text{eff}} = 8.6$ пм/В. Acceptance bandwidth кристалла намного шире (0.157 нм), чем ширина спектральной линии лазера.

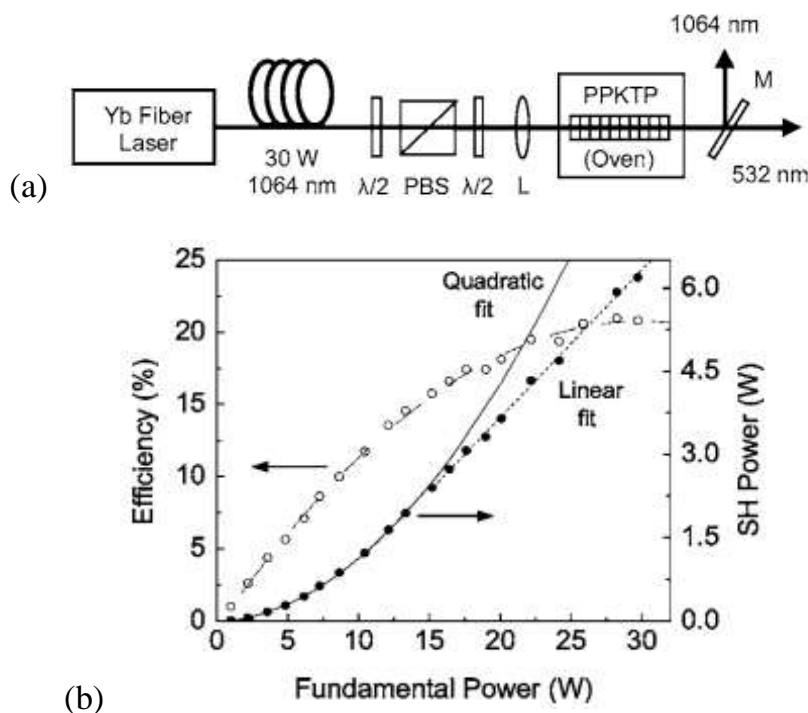
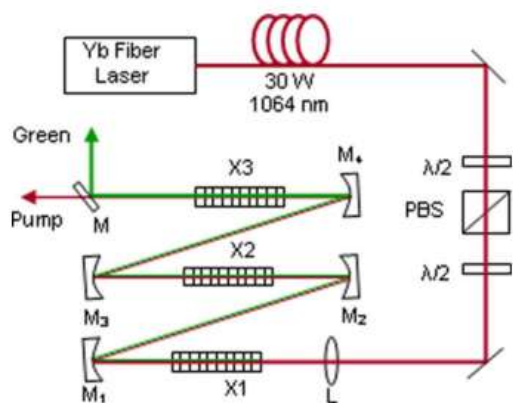


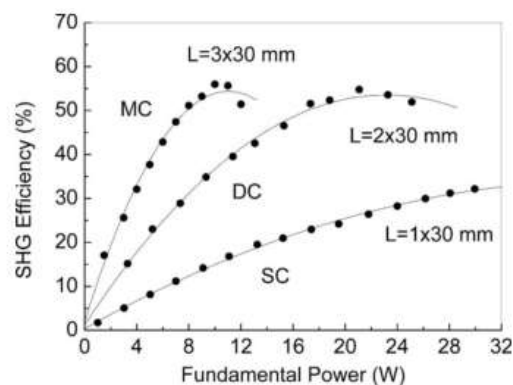
Рисунок 7. (a) Схема генерации второй гармоники непрерывного Yb волоконного лазера в РРКТП и (b) зависимость эффективности и мощности генерации второй гармоники от мощности накачки [32].

При накачке выше 15 Вт была обнаружена зависимость температуры синхронизма от мощности с коэффициентом $0.19^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Отмечается, что такие проблемы можно решить, улучшив температурный контроль образца или каким-либо образом внеся изменения в периодическую доменную решетки для компенсации данного эффекта.

В более поздних работах той же группы авторов [33,34] была предложена методика генерации второй гармоники с применением многокристальной схемы на основе кристаллов стехиометрического танталата лития, легированного 1% MgO (рис. 7a). В такой схеме имеется возможность независимо контролировать температуру и условия фокусировки для каждого из кристаллов, тем самым регулируя степень истощения накачки в зависимости от входной мощности. Авторами была получена эффективность до 56% преобразования в непрерывном режиме (рис. 7б).



(а)



(б)

Рисунок 8. Многокристальная генерация второй гармоники волоконного лазера в одноканальном режиме [33,34]. а) Оптическая схема; б) зависимость эффективности преобразования от мощности накачки.

На основании проведенного анализа рассмотренных научных работ были выявлены основные характеристики преобразователей длины волны излучения для применения в элементной базе современного приборостроения (таблица 1).

Таблица 1.

Основные характеристики преобразователей длины волны.

Характеристика	Значение	Примечание
1. Материал, из которого изготавливаются элементы с периодической доменной структурой	LiNbO ₃ , конгруэнтного состава, легированный 5 моль% MgO (MgOLN) LiTaO ₃ , стехиометрического состава, легированный 1 моль% MgO (MgOSLT)	Для высокоэффективного преобразования излучения до 2-3 Вт средней мощности. Для получения максимально возможной выходной мощности (5-15 Вт).
2. Нелинейно-оптические коэффициенты	MgOLN $d_{33} = 25$ пм/в $d_{eff} = 14-16$ пм/в MgOSLT $d_{33} = 13.8$ пм/в $d_{eff} = 8-9$ пм/в	
3. Рабочая температура	30-80°C	Период доменной структуры должен выбираться для получения температуры синхронизма в данном диапазоне.
4. Точность поддержания температуры	Не хуже $\pm 0.1^\circ\text{C}$	
5. Требования к механической обработке	Обработка рабочих поверхностей – по I классу, ГОСТ 11141-84. Плоскостность $< \lambda/4$ Параллелизм рабочих	Может применяться фаска шириной 50-100 мкм по ребрам кристалла для уменьшения возможности повреждения.

	граней ± 5 минут. Сколы на краях – не более двух, размером не более 100 мкм.	
6. Оптическое просветление рабочих поверхностей	Антиотражающее покрытие на две длины волны. Коэффициенты отражения: ω - не более 0.2% 2ω - не более 0.5%	Для генерации второй гармоники. Для других типов требуется дополнительная спецификация параметров оптического покрытия
Характеристики доменной структуры		
1. Период доменной структуры	4-30 мкм	В зависимости от типа нелинейно-оптического преобразования и длины волны
2. Точность воспроизведения периода доменной структуры	± 10 -100 нм	Для эффективного преобразования
3. Сквасность	$50 \pm 10\%$	Для преобразования первого порядка
4. Длина взаимодействия (длина кристаллов)	0.5 – 50 мм	В зависимости от применения. 0.5 – 1 мм для коротких и ультракоротких лазерных импульсов (пико-и фемтосекундные лазеры) 1-10 мм – импульсные наносекундные лазеры 10-50 мм – непрерывные лазеры
Ширина доменной структуры	От 200 мкм до 10 мм.	Определяется фокусировкой излучения. Широкие элементы могут применяться при использовании цилиндрической оптики для формирования эллиптического сечения пучка.
Толщина	1 мм	Толщина пластин ограничена возможностями создания в них однородной доменной структуры. В настоящее время ведутся разработки способов формирования доменной структуры в пластинах толщиной до 5 мм.
Апертура по толщине	> 0.3 мм	В зависимости от условий фокусировки.

3. Отчет по обобщению и оценке результатов исследований

3.1. Анализ и систематизация полученных результатов по созданию доменной структуры приложением электрического поля с использованием импульсного лазерного облучения и быстрого светового нагрева.

На предыдущих этапах проекта была разработана улучшенная методика создания регулярных прецизионных микродоменных структур в пластинах легированного MgO ниобата лития (MgO:LN) с использованием периодических электродов, которая состоит в воздействии импульсного лазерного излучения на поверхность пластины с периодическими электродами с одновременным или последующим приложением электрического поля.

Реализована методика создания периодической прецизионной доменной структуры в пластинах MgO:LN при воздействии импульсного лазерного облучения и неоднородного электрического поля. Предварительное импульсное воздействие лазерным излучением приводит к образованию приповерхностных доменов под краями полос электрода (увеличению плотности зародышей), не выходящих за пределы полос. Одновременное или последующее приложение высокого напряжения приводит к разрастанию, слиянию и прорастанию сквозь пластину образовавшихся доменов и как следствие к формированию сквозной доменной структуры, соответствующей рисунку полосового электрода. При этом за счет пространственно неоднородного нагрева возникающее при охлаждении пирозлектрическое поле подавляет рост доменов за пределами отдельных полос электрода.

Пластины облучались ИК излучением с длиной волны 10.6 мкм. Выбор длины волны позволил упростить интерпретацию полученных результатов и предположить, что определяющую роль играет воздействие пирозлектрического поля.

Импульсное облучение поверхности пластины с полосовыми электродами приводило к неоднородному нагреву поверхностного слоя за счет различия коэффициентов поглощения и подбора такой длительности импульса, при которой не происходило выравнивания температуры за счет теплопроводности. При этом поверхность под электродом нагревалась существенно сильнее. Охлаждение нагретого слоя после окончания импульса приводило к увеличению спонтанной поляризации и к появлению пирозлектрического поля, приводящего к формированию приповерхностных доменов.

Проведенный нами расчет пространственного распределения проекции на полярную ось пирозлектрического поля, возникающего при охлаждении после неоднородного

нагрева поверхности пластины с полосовыми электродами импульсом лазерного излучения, показал наличие следующих особенностей:

- под краями полосового электрода возникает максимальное значение проекции пирозлектрического поля на полярную ось, способствующей формированию приповерхностных доменов;
- знак проекции пирозлектрического поля на полярную ось между полосами электрода препятствует переключению поляризации и приводит к подавлению роста приповерхностных доменов за пределы электродов.

Было продемонстрировано, что образование приповерхностных доменов в результате воздействия импульса лазерного излучения существенно улучшает пространственную однородность формирующейся доменной структуры при последующем приложении электрического поля и позволяет создавать доменную структуру, параметры которой точно соответствуют параметрам структуры полосовых электродов.

Таким образом, удалось разработать методику, позволяющую формировать сквозные доменные структуры в монокристаллической пластине нелинейно-оптического сегнетоэлектрика ниобата лития, легированного MgO:LN , в соответствии с рисунком полосового электрода. Показано, что использование разработанной методики позволяет создавать периодические полосовые структуры для преобразования частоты лазерного излучения. Было высказано утверждение о том, что полученные структуры могут быть использованы как в оптических системах записи и считывания информации, так и в волоконно-оптической связи и в лазерных проекционных системах.

Вместе с тем работу нельзя считать завершенной, поскольку не был достаточно глубоко изучен механизм формирования нанодоменной структуры в результате импульсного лазерного облучения, что затрудняло оптимизацию разрабатываемых методик создания периодических доменных структур.

Ранее мы предполагали, что нанодоменная структура формируется в результате импульсного лазерного облучения в основном под действием пирозлектрического поля, однако это предположение требовало экспериментального подтверждения. Для этого было проведено исследование формирования доменной структуры в сильнонеравновесных условиях переключения, создаваемых в результате локального импульсного нагрева, что позволило существенно увеличить напряженность переключающего пирозлектрического поля.

Локальный нагрев исследуемой пластины производился как импульсами лазерного излучения, так и пропусканием импульсов тока вдоль металлического электрода, нанесенного на полярную поверхность. При таких воздействиях нагревалась только часть пластины, и последующее охлаждение осуществлялось переносом тепла в не нагретую часть. При интерпретации результатов ограничивались приближением однородного изменения температуры [35].

3.1.1. Нагрев пропусканием импульсов тока вдоль металлического электрода, нанесенного на полярную поверхность

Образование новых доменов в монокристаллической пластине под действием пироэлектрического поля возможно лишь при нагреве выше температуры, при которой происходит полное экранирование деполяризующего поля T_{\max} . В этом случае при охлаждении пироэлектрическое поле изменяет знак и становится переключающим.

Резистивный нагрев пропусканием импульса тока вдоль нанесенных на одну полярную поверхность полосовых электродов использовался для того, чтобы продемонстрировать возможность ориентированного роста доменных лучей в пироэлектрическом поле. Для исследований использовались пластины MgO:CLN толщиной 0.5 мм. Плотность выделяемой энергии определялась из Джоулева тепла

$$\Delta Q = I^2 R t, \quad (5)$$

где I – сила тока, R – сопротивление, t – длительность импульса.

При плотности энергии 5 Дж/см^2 и длительности импульса тока $0,5 \text{ мс}$ образовывались изолированные несквозные домены с концентрацией 50 мм^{-2} (Рисунок 24.).

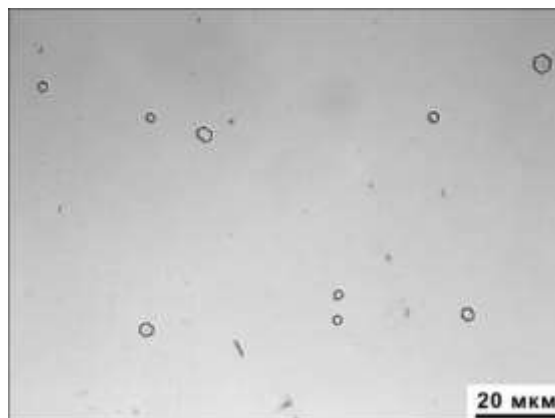


Рисунок 24. Изолированные домены, образовавшиеся после пропускания вдоль электрода импульса тока. Длительность $0,5 \text{ мс}$, плотность

энергии 5 Дж/см^2 . Оптическая микроскопия после химического травления. MgO:CLN .

При плотности энергии более 10 Дж/см^2 доменная структура качественно изменялась и наблюдался анизотропный рост преимущественно вдоль трёх Y направлений доменных лучей шириной от сотен нанометров до единиц микрон (Рис. 25).

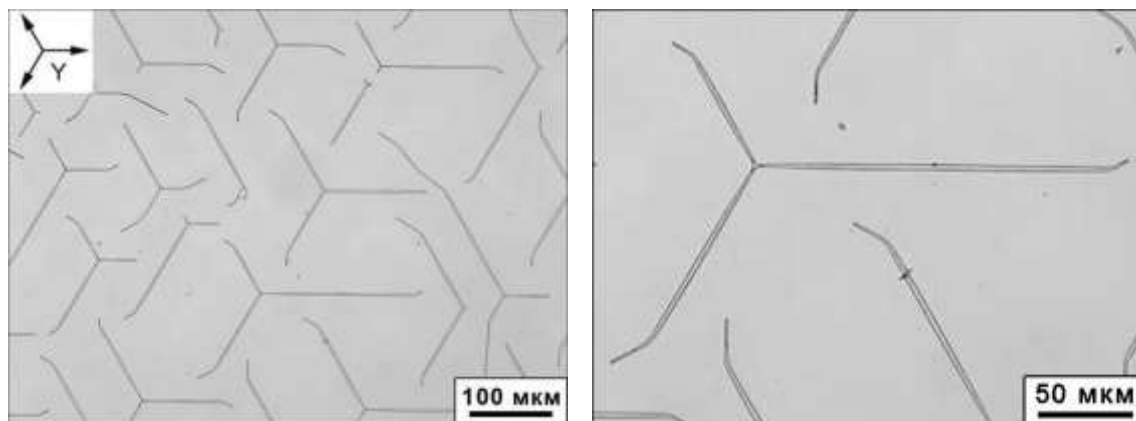


Рисунок 25. Доменные лучи, образовавшиеся после пропускания вдоль электрода импульса тока. Длительность 0,5 мс, плотность энергии $11,3 \text{ Дж/см}^2$. Оптическая микроскопия после химического травления. MgO:CLN .

Таким образом, удалось однозначно показать, что такие же доменные структуры, что и при использовании лазера, могут быть созданы в результате импульсного резистивного нагрева. Полученный результат является подтверждением пирозлектрической природы переключающего поля.

3.1.2. Облучение инфракрасными лазерными импульсами.

Для понимания механизма возникновения доменной структуры принципиальную роль играет непосредственное наблюдение ее формирования с помощью оптической поляризационной микроскопии

Необходимо отметить, что для формирования нанодоменных структур в LN нужно использовать сильно поглощаемое лазерное излучение ультрафиолетового (УФ) и инфракрасного (ИК) диапазонов. Выбор ИК облучения обусловлен тем, что оно только нагревает кристалл, тогда как УФ излучение дополнительно увеличивает концентрацию носителей заряда, что влияет на формирование доменной структуры

Для дальнейшего увеличения скорости нагрева использовалось облучение с помощью инфракрасного (ИК) импульсного CO_2 лазера с длиной волны 10.6 мкм . При этом скорость

и максимальная температура нагрева определялись плотностью энергии, длительностью импульса и температурой пластины во время облучения.

3.1.2.1. Кинетика формирования доменной структуры в результате импульсного лазерного облучения

Все имеющиеся к настоящему времени данные о самоорганизованных доменных структурах, возникающих в результате импульсного лазерного облучения, были получены только из анализа статических структур.

Нами впервые был непосредственно визуализирован с высоким разрешением по времени (с помощью скоростной видеокамеры) процесс формирования доменной структуры в результате импульсного лазерного облучения пластины CLN. В процессе измерений полярная Z^+ поверхность пластины размерами $20 \times 20 \times 0.5$ мм облучалась при комнатной температуре одиночным ИК импульсом длительностью от 1 до 4.5 мс. Плотность энергии на поверхности пластины изменялась при этом от 5 до 18 Дж/см^2 .

В результате непосредственно в процессе формирования доменной структуры были получены серии мгновенных изображений доменов с хорошим контрастом и достаточным разрешением по времени (Рисунок 26.). Было обнаружено, что конечная структура является стабильной и в отличие от переключения в электрическом поле, отсутствует самопроизвольное обратное переключение.

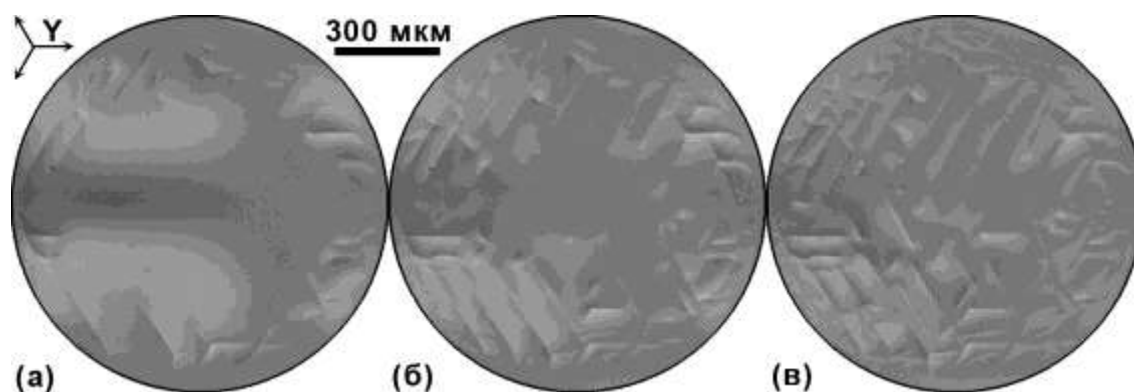


Рисунок 26. Мгновенные изображения доменной структуры в CLN после облучения одиночным ИК импульсом через (а) 11 мс, (б) 28 мс, (в) 78 мс от начала импульса.

Длительность импульса 3 мс, плотность энергии 12.7 Дж/см^2 .

Удалось определить полное время формирования структуры, которое изменялось от 10 до 90 мс при изменении длительности облучающего импульса. Важно отметить, что наблюдалась задержка между окончанием импульса и началом переключения длительностью от 3 до 35 мс. В рамках рассмотренной модели задержка соответствует времени охлаждения пластины до температуры, при которой пирозлектрическое поле превышает пороговое значение (Рисунок 27.). Оценка изменения температуры поверхности пластины дает близкие результаты.

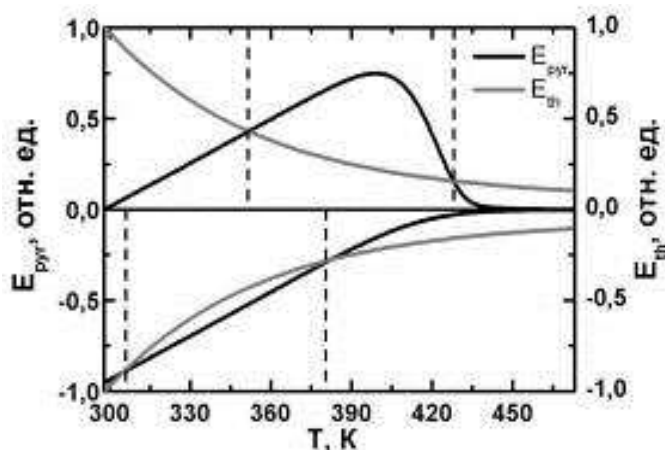


Рисунок 27. Расчетная температурная зависимость пирозлектрического поля E_{pyr} при нагреве от 300K до 490K и последующем охлаждении с постоянной скоростью изменения температуры 10K/мин и температурная зависимость порогового поля E_{th} .

Анализ полученных изображений позволил выявить три последовательных стадии эволюции доменной структуры: 1) зародышеобразование, 2) рост доменных лучей, и 3) ветвление [6]. Образование новых доменов происходило на краю облученной зоны (Рисунок 26. а), что обусловлено увеличением вероятности зародышеобразования, вызванным образованием максимумов пирозлектрического поля после окончания импульса [35] (Рисунок 28.).

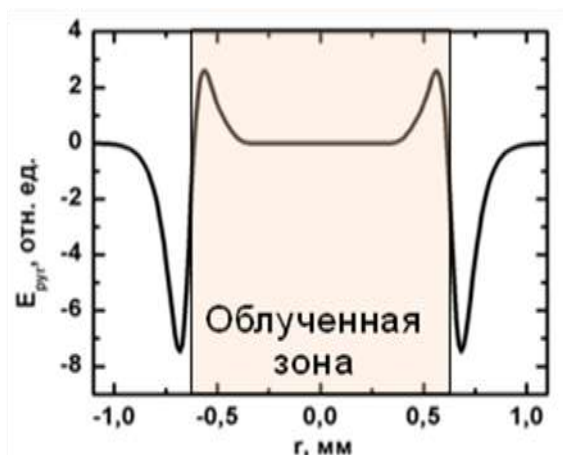


Рисунок 28. Расчетное распределение $E_{\text{руг}}$ после импульсного облучения [35].

Одномерный рост доменных лучей наблюдается от края к центру облученной зоны преимущественно вдоль трёх γ кристаллографических направлений (Рисунок 26. б). При ветвлении появлялись лучи второго поколения, рост которых начинался от лучей первого поколения (Рисунок 26. в).

Исследование конечной статической доменной структуры с высоким пространственным разрешением методом СМПО показало, что лучи представляют собой на начальной стадии цепи изолированных нанодоменов, которые становились непрерывными лучами в результате роста и слияния (Рисунок 29а).

Установлено, что на стадии ветвления всегда существует задержка между образованием лучей первого и второго поколения (Рисунок 29а). При этом рост лучей второго поколения, как правило, происходит в X направлении перпендикулярно лучу первого поколения и начинается на некотором расстоянии от него (Рисунок 29г).

Впервые были выявлены два сценария формирования трёх лучевой звезды в центре облученной зоны.

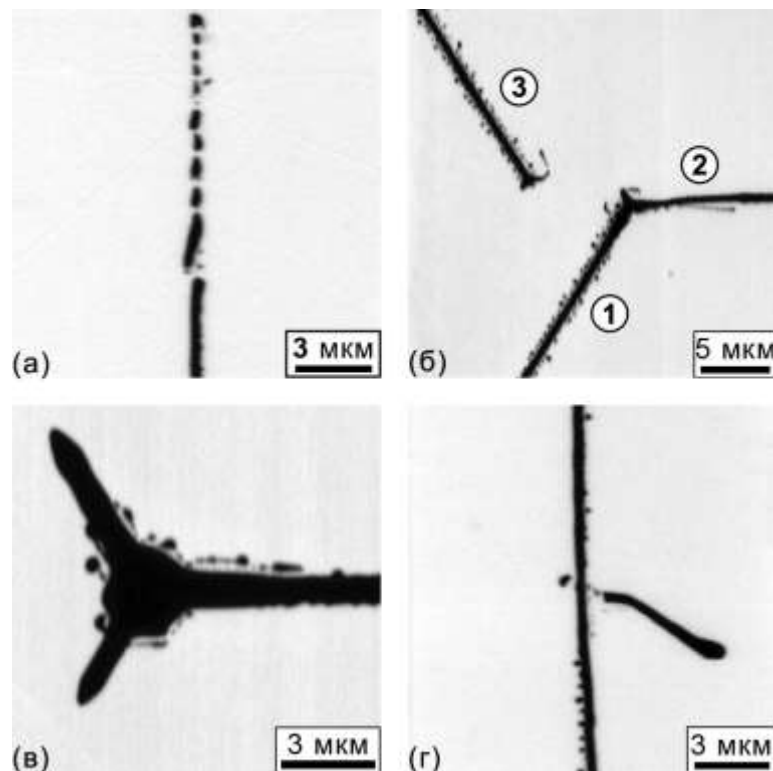


Рисунок 29. (а) Цепь изолированных нанодоменов, переходящая в луч; (б) и (в) формирование трёх лучевой звезды; (г) ветвление в CLN. Метод СМПО.

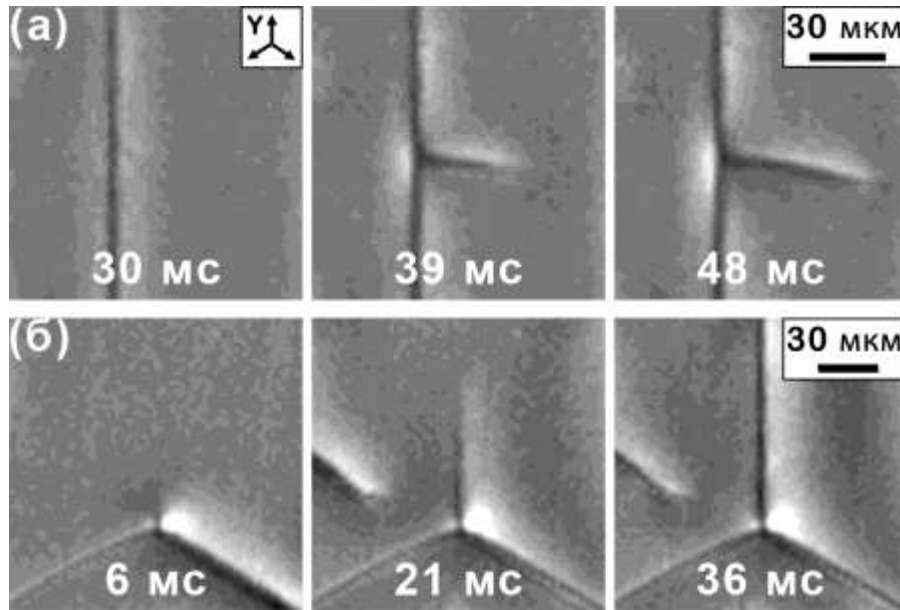


Рисунок 30. (а) Ветвление, (б) формирование трёх лучевой звезды в CLN после облучения одиночным ИК импульсом. Оптическая микроскопия.

Первый сценарий аналогичен ветвлению и начинается с образования изолированного домена с последующим ростом доменных лучей в Y направлениях (Рисунок 29б). Первый и второй лучи растут одновременно, а рост третьего луча начинается после задержки на некотором расстоянии от предыдущих двух лучей (Рисунок 29б). Таким образом, трёх лучевая звезда состоит из двух лучей первого поколения и одного луча второго поколения (ветви).

Второй сценарий представляет собой одновременный рост трёх лучей из несмежных вершин шестиугольного домена, существовавшего в облученной зоне (Рисунок 29в), что обусловлено детерминированным зародышеобразованием [37].

Необходимо отметить, что доля переключенной площади после импульсного лазерного нагрева составляет менее одного процента от площади облученной зоны. Средняя ширина лучей около 500 нм, суммарная длина всех лучей порядка 10 мм, а диаметр облученной зоны 1 мм. Таким образом, в вызванных лазерным нагревом сильнонеравновесных условиях общая длина доменных лучей (L) может быть определена с высокой точностью и является более адекватной характеристикой процесса переключения

поляризации, чем их площадь (Рисунок 31. а). Анизотропия роста лучей, определяемая как доля лучей, ориентированных в Y направлении (L_Y/L), также является важной характеристикой процесса. При формировании доменной структуры анизотропия роста существенно уменьшается (Рисунок 31. б).

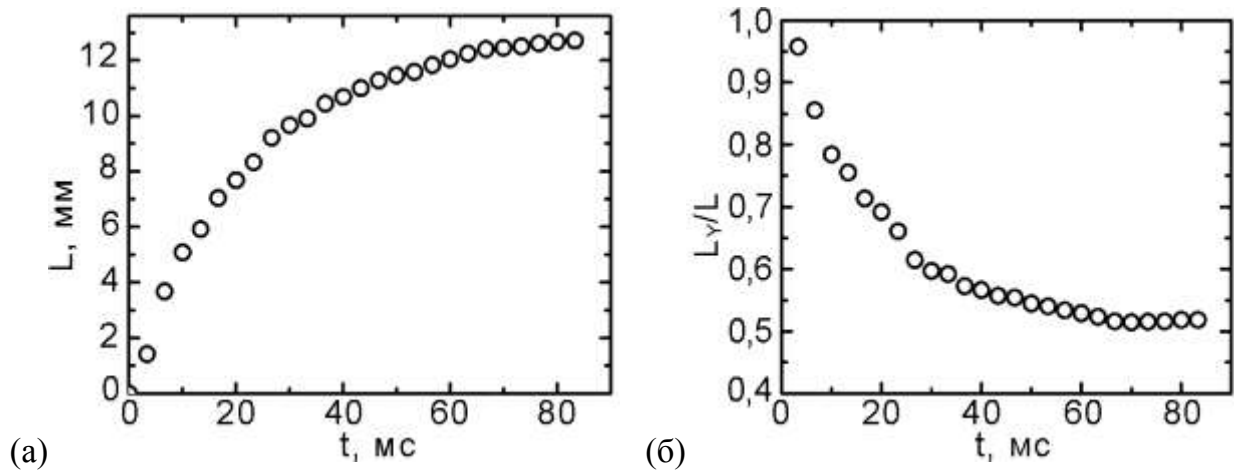


Рисунок 31. Зависимость от времени: (а) длины доменных лучей, (б) анизотропии их роста в CLN после облучения одиночным ИК импульсом.

3.1.2.2. Зависимость параметров доменной структуры от условий облучения

Зависимость от температуры пластины. Исследование параметров доменных структур, возникающих в результате облучения одиночным ИК лазерным импульсом, от температуры пластины T_0 проводилось в CLN. Производилось облучение соседних участков одной пластины одинаковыми лазерными импульсами при различных температурах, изменявшихся от комнатной до 390К. Визуализация доменных структур производилась после селективного химического травления с помощью оптического микроскопа в отражённом свете с последующей статистической обработкой полученных изображений.

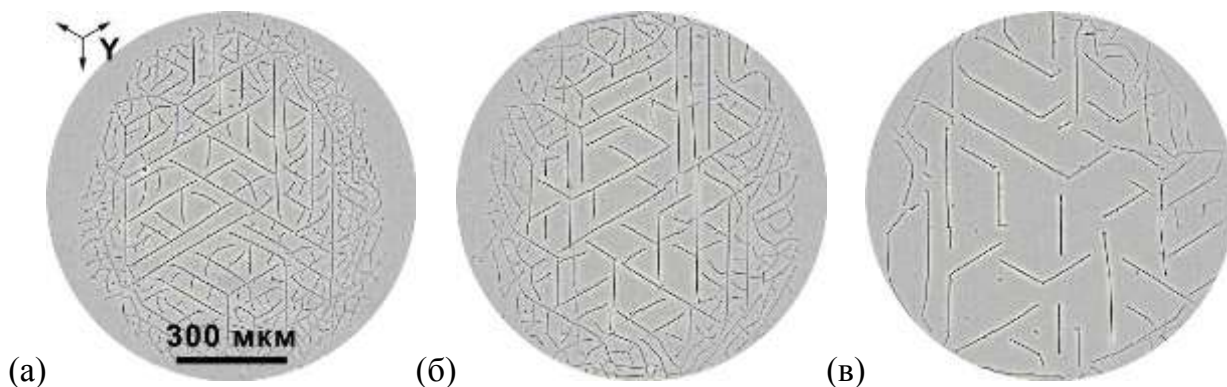


Рисунок 32. Изображения доменной структуры в CLN после ИК лазерного облучения при различной температуре: (а) 320К, (б) 340К; (в) 370К. Длительность импульса 1.5 мс. Плотность энергии 11.7 Дж/см². Оптическая микроскопия. Доменная структура выявлена химическим травлением.

Типичные доменные структуры, возникающие после лазерного облучения при разной температуре, представлены на Рисунок 32. Доменные структуры, полученные при температуре ниже 320К, состоят как из Y ориентированных доменных лучей, так и из лучей, растущих в произвольных направлениях, преимущественно на краю облученной зоны. Кроме того наблюдается эффект ветвления (Рисунок 32. а). Увеличение температуры пластины приводит к линейному уменьшению суммарной длины доменных лучей L (Рисунок. 33а), эквивалентной переключенному заряду. Кроме того, уменьшается количество ветвлений (Рисунок 32. б,в). Выше 380К нагрев одиночным лазерным импульсом при данной плотности энергии и длительности импульса не приводил к формированию доменной структуры.

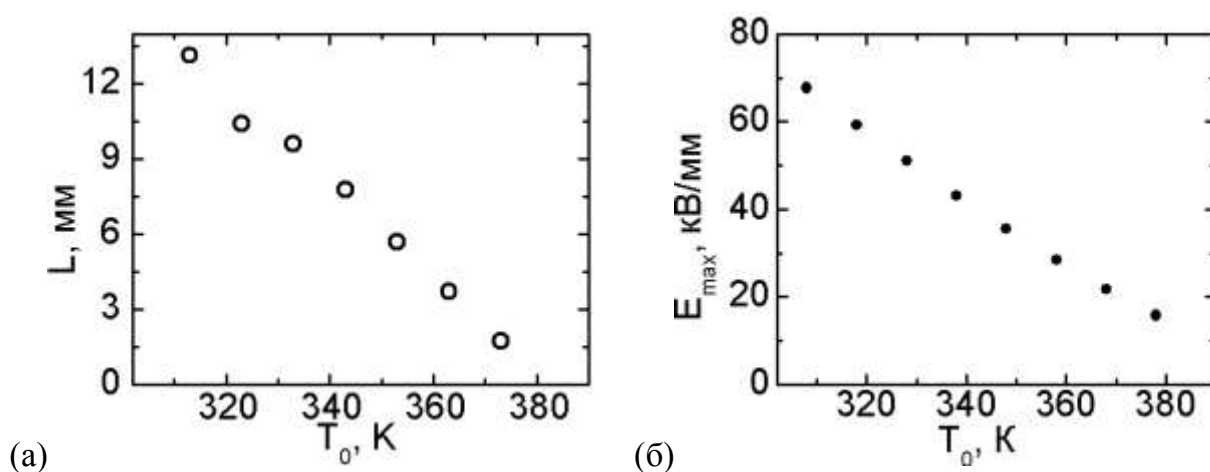


Рисунок. 33. Зависимость от температуры пластины (а) общей длины доменных лучей в CLN после импульсного облучения, (б) рассчитанного значения E_{\max} .

Доля переключенной области пропорциональна максимальному изменению пьезоэлектрического поля E_{max} . С помощью компьютерного моделирования было показано, что увеличение температуры пластины приводит к линейному уменьшению (Рисунок. 33б), что объясняет экспериментально наблюдаемое уменьшение общей длины доменных лучей при увеличении температуры.

3.1.3. Особенности формирования доменных структур, индуцированных ИК лазерным излучением, в ниобате лития, легированном MgO

Исследования показали, что в CLN, легированном MgO, качественно изменяется вид доменных структур, возникающих после ИК лазерного облучения. В этом случае доменные структуры состоят из большого количества триплетов, лучи которых строго ориентированы вдоль Y кристаллографических направлений (Рисунок. 34.). Длина лучей в триплетах достигает нескольких десятков микрон. Наблюдается выраженный эффект ветвления. Существенно ослабляется взаимодействие лучей, что проявляется в отсутствии эффекта отражения.

Различие доменной структуры в MgO:CLN и нелегированного CLN связано с различной электропроводностью этих кристаллов. Более высокая проводимость MgO:CLN приводит к более эффективному объемному экранированию деполяризующего поля. В результате при одинаковых условиях облучения возникающие пьезоэлектрические поля существенно меньше, чем в CLN, и доменные лучи растут анизотропно, преимущественно вдоль Y направлений.

Установлено, что увеличение длительности лазерного импульса приводит к качественному изменению доменной структуры: в центре облученной зоны, что проявляется в уменьшении концентрации нанодоменных лучей и уменьшении проявления эффекта ветвления вплоть до его полного исчезновения (Рисунок. 34. г).

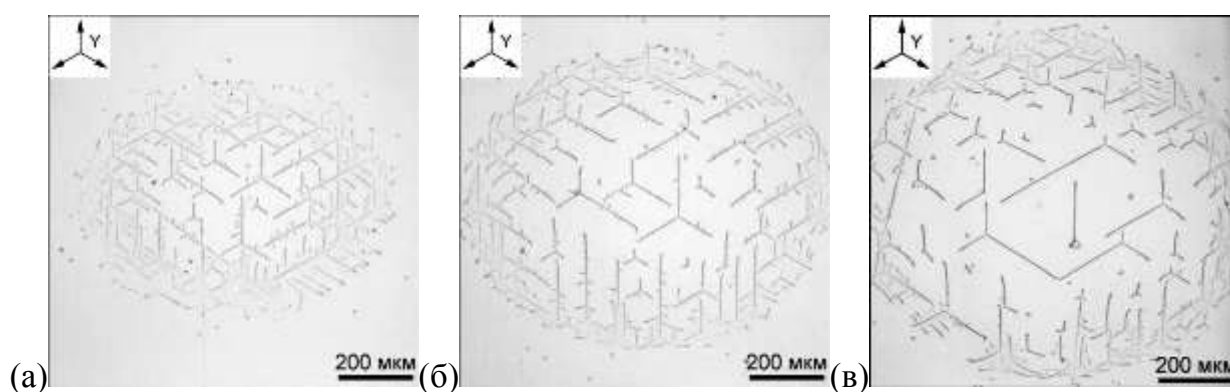


Рисунок. 34. Зависимость доменной структуры в MgO:CLN от длительности ИК лазерного импульса: (а) 1.5 мс; (б) 2.5 мс; (в) 3.5 мс. Оптическая микроскопия. Доменная структура выявлена химическим травлением.

Наблюдаемые эффекты могут быть отнесены за счет уменьшения пироэлектрического поля в центре облученной зоны при больших длительностях импульса.

Таким образом, проведенные детальные экспериментальные и теоретические исследования кинетики доменов под действием пироэлектрического поля, возникающего при охлаждении после импульсного нагрева, позволили заложить основы для создания технологий изготовления нанодоменных структур. Изменение длительности импульсов и плотности энергии позволяет управлять анизотропией роста доменных лучей и их средним периодом. Последующее приложение электрического поля позволяет изготавливать периодические доменные структуры в монокристаллах ниобата лития.

3.2. Анализ возможностей применения периодических доменных структур и определение оптимальной номенклатуры нелинейно-оптических преобразователей длины волны излучения для построения приборов на новых физических принципах.

Как правило, источники лазерного излучения имеют фиксированную длину волны, которая определяется энергиями переходов между различными состояниями электронной оболочки ионов. В то же время, для применения зачастую необходимы лазеры с различной длиной волны, а также с возможностью ее перестройки. Преобразование длины волны лазерного излучения позволяет расширить диапазон доступных длин волн. Среди областей применения лазеров с преобразованием длины волны: проекционная техника, лазерная локация, зондирование атмосферы, медицинская диагностика, хирургия, прецизионная маркировка и обработка различных материалов, спектроскопия и разнообразные научные применения.

Для эффективного преобразования необходимо выполнять условие фазового синхронизма – равенство фазовых скоростей накачки и преобразованного излучения. Традиционным решением является использование двух ортогонально поляризованных оптических волн, сдвиг фаз между которыми компенсируется за счет двулучепреломления. Невысокие значения нелинейно-оптических коэффициентов и наличие углового апертурного эффекта приводят к низкой эффективности преобразования и ухудшению

качества пучка. Кроме того, диапазон длин волн, для которых в определенном кристалле можно реализовать условия фазового синхронизма, существенно ограничен.

Альтернативным способом является применение «фазового квазисинхронизма» с периодической модуляцией знака нелинейной восприимчивости (Рис. 35). При этом волновой вектор периодической структуры подбирается таким образом, чтобы скомпенсировать разницу волновых векторов взаимодействующих волн. Эффект был теоретически рассмотрен в начале 1960-х в классической работе Дж. Армстронга и Н. Бломбергера с соавторами, но практическое применение получил только в середине 1990-х годов.

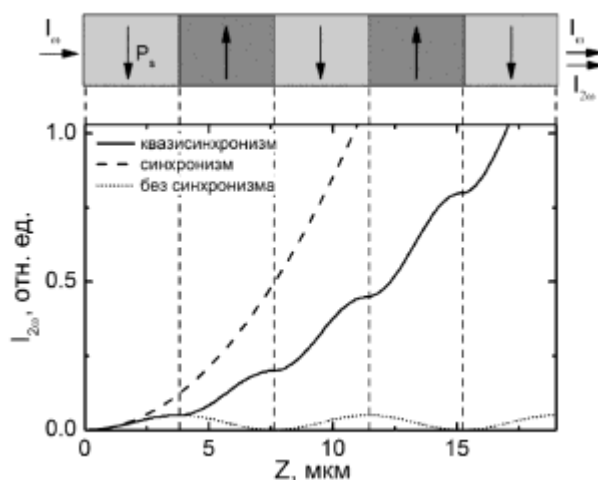


Рисунок. 35. Изменение интенсивности излучения второй гармоники $I_{2\omega}$ при различных режимах синхронизма с одинаковым значением эффективного нелинейно-оптического коэффициента d_{eff} . Для режима фазового квазисинхронизма схематично показана доменная структура.

Для реализации фазового квазисинхронизма применяются нелинейно-оптические сегнетоэлектрические кристаллы с регулярной доменной структурой РДС («домены» представляют собой области сегнетоэлектрика с однородным направлением спонтанной поляризации). Локальное изменение направления спонтанной поляризации в электрическом поле используется для создания РДС с заданными геометрическими параметрами. Фазовый квазисинхронизм позволяет осуществлять эффективное взаимодействие волн, поляризованных вдоль оптической оси кристалла, тем самым используя максимальное значение нелинейно-оптического коэффициента (d_{33}) и избегая углового апертурного эффекта. Кроме того, можно обеспечить синхронизм для различных нелинейно-оптических процессов в кристаллах одного типа при выбранной рабочей

температуре, а также создавать каскадные преобразователи на одном кристалле. Наиболее популярными материалами для РДС-кристаллов служат монокристаллы семейств ниобата лития (LN) и танталата лития (LT), а также калий титанил фосфата (КТР). Однако, в большинстве применений требуется повышенная стойкость к оптическому повреждению кристалла за счет фоторефрактивных эффектов. Для этого кристаллы ниобата лития и танталата лития легируют MgO. Примесь повышает объемную проводимость и способствует компенсации фоторефрактивных зарядов. В связи с этим оптимальным материалом для создания РДС для оптических применений является ниобат лития, легированный 5% MgO (MgOLN).

Наиболее распространенные применения РДС-кристаллов: а) генерация второй гармоники в сине-зеленом диапазоне, б) параметрическая генерация в среднем ИК диапазоне, в) генерация разностных частот, г) генерация и детектирование ТГц излучения. Источниками накачки служат твердотельные, диодные или волоконные лазеры с узкой спектральной шириной и линейной поляризацией излучения.

Параметрическая генерация излучения в среднем ИК диапазоне имеет потенциал для применения в приборах типа ЛИДАР (“Light Identification, Detection and Ranging” - технология получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления отражения света и его рассеивания в прозрачных и полупрозрачных средах). В частности, для лазерных дальномеров и систем сопровождения целей требуется переход от излучения с длиной волны вблизи 1 мкм к излучению в спектральном диапазоне, безопасном для человеческого глаза (с длиной волны около 1,5 мкм), которое может быть получено с помощью оптической параметрической генерации. Лазерные приборы зондирования атмосферы, применяемые для контроля содержания различных газов, требуют источники излучения с определенными длинами волн, совпадающими с линиями поглощения газов. В частности, весьма актуальной является задача обнаружения утечек метана на газопроводах, наиболее интенсивная линия поглощения которого имеет длину волны около 3.2 мкм, которая в настоящее время получается с помощью низкоэффективных, дорогих и габаритных He-Ne лазеров. Применение оптической параметрической генерации с волоконными лазерами (в качестве источников излучения накачки) позволит существенно снизить энергопотребление и сделать такие ЛИДАРЫ мобильными, годными в частности для размещения на беспилотных летательных аппаратах.

Генерация второй гармоники может быть использована, в частности, для получения излучения в сине-зеленом диапазоне из излучения в ближнем ИК диапазоне, генерация которого легко реализуется с помощью большого разнообразия полупроводниковых, твердотельных и волоконных лазеров. Различные виды лазерной спектроскопии, конфокальная лазерной сканирующей микроскопии требуют применения компактных источников видимого излучения в сине-зеленой части спектра, лазеров с различными длинами волн в сине-зеленой части спектра, которые могут быть получены с применением преобразования длины волны на основе кристаллов с регулярной доменной структурой. Оптические стандарты частоты, изготавливаемые за счет лазерного охлаждения и пленения нейтральных атомов требуют возбуждения в диапазоне длин волн 300-500 нм.

Широкие возможности для применения сине-зеленых лазерных источников имеются в биомедицине для цитометрии (подсчет количества определенных клеток в жидкости) и секвенирования ДНК. Для этого используются флюоресцирующие метки, которые как правило возбуждаются излучением в диапазоне от ближнего УФ до зеленого.

Также источники зеленого излучения используются в подводной оптической связи, оптических системах хранения информации, лазерных проекционных системах.

Генерация разностных и суммарных частот широко применяется в телекоммуникационной технике для преобразования, соответствующего различным каналам спектрального мультиплексирования или преобразования сигнала одного диапазона в другой.

Проблема генерации терагерцового излучения в последнее время становится все более актуальной в связи с широким спектром его применений: для медицины (ТГц томография), телекоммуникаций (системы беспроводной связи) и систем безопасности (ТГц сканеры). Вместе с тем существующие на данный момент методы генерации не обладают достаточной эффективностью и не позволяют делать компактные устройства на их основе. С нелинейно-оптических преобразователей на основе РДС могут быть созданы преобразователи оптического излучения в терагерцовое с частотой 300 ГГц – 3 ТГц. Следует отметить, что источники излучения в данном диапазоне исключительно важны для развития методов медицинской ТГц томографии, так как она потенциально менее вредна для организма, чем, например, рентгеновская томография за счет гораздо меньшей энергии квантов излучения.

Изготовление элементов для конкретного вида преобразования длины волны требует расчета необходимых параметров доменной структуры.

Основными рассчитываемыми параметрами доменной структуры являются:

- период структуры - Λ
- скважность (соотношение ширины доменов одного знака к периоду) - D
- длина части элемента с периодической доменной структурой (рабочая длина) - L
- ширина элемента - W
- толщина элемента – d
- рабочая температура (температура синхронизма) – T_{qpm}

Ширина элемента определяется, исходя из требований к пучку излучения накачки. Как правило, для получения генерации в объеме элемента второй гармоники излучения, имеющего двумерный гауссов профиль пучка, используется ширина 1-2 мм. Поэтому минимальная ширина периодической части элемента должна соответствовать этому условию. С другой стороны, в разработанной технологии, при необходимости, ширина элемента может быть легко увеличена до 5 мм и даже 10 мм, что необходимо при применении цилиндрической оптики для фокусировки излучения.

Толщина элемента играет важную роль, так как она ограничивает применение широких пучков излучения накачки, что может быть необходимо при больших значениях генерируемой мощности (от 10 Вт и более). На сегодняшний день толщина элементов ограничена толщиной используемых подложек – 0.5 мм и 1 мм. Применение подложек большей толщины затруднено в связи с тем, что в процессе формирования доменной структуры необходимо приложение высокого электрического напряжения, которое может превысить порог электрического пробоя. Тем не менее, разрабатываемая технология открывает возможности преодоления этого порога за счет снижения величины переключающего напряжения, обусловленного формированием зародышей доменов с высокой плотностью с помощью импульсного лазерного облучения. Таким образом, оптимальной толщиной элементов на сегодняшний день является 1 мм.

Длина элемента рассчитывается из требований к эффективности в зависимости от входной мощности и режима накачки (непрерывный или импульсный режим, частоты следования и длительности импульса для импульсного режима). Для повышения коэффициента преобразования требуется повысить плотность мощности излучения накачки, что делается с помощью фокусировки излучения в кристалл. Показано, что при фокусировке зависимость эффективности преобразования от длины кристалла изменяется

от линейной ($\eta \sim L$) при конфокальной фокусировке до квадратичной ($\eta \sim L^2$) при относительно слабой фокусировке.

В случае произвольной фокусировки излучения могут наблюдаться и другие варианты зависимости эффективности преобразования от длины кристалла. Аналитический расчет, проведенный Kleiman с соавторами, показал, что максимальная эффективность преобразования достигается при выполнении следующего условия:

$$l \approx 2.84 * L \quad (6)$$

Кроме того, рабочая длина кристалла выбирается в соответствии с режимом работы накачки. Для эффективного преобразования непрерывных

Период доменной структуры выбирается таким образом, чтобы скомпенсировать рассогласование фаз между волнами участвующими в нелинейно-оптическом преобразовании, иными словами обеспечить выполнение условия фазового квазисинхронизма для эффективного преобразования длины волны. В простейшем случае генерации второй гармоники это условие имеет вид:

$$\Delta k = k_{2\omega} - 2 k_{\omega} - 2\pi/\Lambda = 0 \quad (7)$$

где $k_{2\omega}$, $2k_{\omega}$ - волновые вектора излучения первой и второй гармоники.

$$k_{\omega} = 2\pi/(n \lambda(\omega)) \quad (8)$$

В уравнение (8) входит показатель преломления n_e для различных температур T и длин волн λ . Такая зависимость в кристаллах ниобата и танталата лития описывается уравнением Селмейера следующего вида:

$$n_e^2(\lambda, T) = a_1 + b_1 f(T) + \frac{a_2 + b_2 f(T)}{\lambda^2 - a_3^2} + \frac{a_4 + b_3 f(T)}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2. \quad (9)$$

где a_i , b_i – эмпирические параметры формулы, определяемые экспериментально, $f(T) = (T - 24.5)(T + 570.82)$.

Для конгруэнтных, нелегированных кристаллов параметры этого уравнения известны с достаточно хорошей точностью. Однако, для ниобата лития, легированного MgO (типичная концентрация 5%) оптические параметры заметно изменяются. Существует несколько наборов коэффициентов, эмпирически определенных для различных диапазонов длин волн [38-43].

С использованием приведенных данных определяется и рабочая температура (температура квазисинхронизма). Для получения высокой эффективности преобразования длины волны необходимо создавать прецизионную периодическую доменную структуру с

минимальной дисперсией периода по длине. В противном случае неоднородность периода приведет к вариации рабочей температуры уменьшению общего коэффициента преобразования. По расчетным для обеспечения высокой эффективности данным дисперсия периода по длине элемента не должна превышать 10-20 нм.

Периоды для генерации второй гармоники ИК излучения составляют от 4 до 15 мкм, а для оптической параметрической генерации и генерации суммарных/разностных частот от 10 до 30 мкм. Характерные периоды для генерации ТГц излучения составляют от 30 до 200 мкм.

На основе проведенного анализа возможных применений, расчетов условий фазового квазисинхронизма и полученных экспериментальных данных была сформулирована оптимальная номенклатура нелинейно-оптических преобразователей длины волны с использованием РДС в MgOLN (Таблица 5).

Таблица 5

Номенклатура нелинейно-оптических преобразователей длины волны с использованием РДС в кристаллах MgOLN для различных типов применений.

Тип элемента	Длина волны, нм вход	Длина волны, нм выход	Период доменной структуры, мкм	Рабочая температура, °С	Размеры, (ДхШхВ, мм)
Генерация второй гармоники					
Генерация зеленого света, непрерывные твердотельные Nd:YAG лазеры	1064	532	6.93 - 6.98	в диапазоне от 30 до 80	10-30x1-3x1
Генерация зеленого света, непрерывные твердотельные Nd:YAG лазеры, цилиндрическая оптика	1064	532	6.93 - 6.98	в диапазоне от 30 до 80	10-30x1-10x1
Генерация зеленого света, непрерывные волоконные лазеры	1060-1080	530-540	6.9 - 7.25	в диапазоне от 30 до 80	10-30x1-3x1
Генерация зеленого света, непрерывные волоконные лазеры, цилиндрическая оптика	1060-1080	530-540	6.9 - 7.25	в диапазоне от 30 до 80	10-30x3-10x1
Генерация оранжевого света, непрерывные волоконные лазеры	1178-1180	589-590	9.4-9.46	в диапазоне от 30 до 80	10-30x1-3x1
Генерация излучения с длиной волны около 780 нм, непрерывные волоконные лазеры	1530-1600	765-800	18.5-20.9	в диапазоне от 30 до 80	10-30x1-3x1
Генерация зеленого	Как для	Как для	В соответствии	в диапазоне	5-10x1-3x1

света, импульсных ИК лазеров (пс - нс диапазон длительности импульса)	непрерывных лазеров	непрерывных лазеров	с периодами для непрерывных лазеров	от 30 до 80	
Генерация второй гармоники фемтосекундных лазеров	Как для непрерывных лазеров	Как для непрерывных лазеров	В соответствии с периодами для непрерывных лазеров	в диапазоне от 30 до 80	0.5-1x1-3x1
Генерация синего излучения 488 нм в непрерывном режиме (диодный лазер)	976	488	5.0-5.3	в диапазоне от 30 до 80	5-30x1-3x1
Генерация синего излучения 488 нм в непрерывном режиме (диодный лазер)	946	473	4.6-4.8	в диапазоне от 30 до 80	5-30x1-3x1
Оптическая параметрическая генерация					
Оптическая параметрическая генерация	1064	1410 – 2128, 2128 - 4335	27.91, 28.28, 28.67, 29.08, 29.52, 29.98, 30.49, 31.02, 31.59 (в зависимости от температуры и длины волны)	в диапазоне от 30 до 200	1-30x1-3x1

3.3. Рекомендации по возможности использования результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики.

Полученные результаты обладают мировой новизной. Они представляют значительный интерес для развития методов доменной инженерии при создании периодических и квазипериодических доменных структур при изготовлении нелинейно-оптических элементов, используемых для изменения частоты лазерного излучения.

Разрабатываемая технология обладает существенными преимуществами перед аналогами, поскольку открывает возможности для прецизионного контроля формы и размеров полосовых доменов в периодической доменной структуре. В частности, использование новой технологии позволяет уменьшать период структур, вплоть до перехода к субмикронным периодам, что принципиально невозможно при использовании известных технологий.

Технология формирования периодических доменных структур в LN позволит создать преобразователи частоты излучения для источников видимого света, используемых в проекционном телевидении, формировании цифровых изображений, медицине,

полупроводниковом производстве и хранении данных. Результаты могут быть использованы предприятиями, производящими лазеры и лазерную технику различного назначения.

Результаты проекта могут быть использованы в приоритетном направлении развития науки, технологий и техники в Российской Федерации “Индустрия наносистем и материалов” и критических технологиях Российской Федерации: “Нанотехнологии и наноматериалы”.

3.4. Рекомендации по использованию результатов НИР при разработке научно-образовательных курсов.

Сведения из аналитического обзора и полученные оригинальные научные результаты были включены в программы специальных учебных курсов.

Полученные лабораторные образцы в дальнейшем могут быть использованы в качестве пособий для проведения практикумов по сканирующей зондовой микроскопии для студентов физического и химического факультетов УрГУ.

Результаты работы используются в учебном процессе для подготовки курсовых дипломных работ студентами физического факультета, а также для модернизации спецкурсов «Физика сегнетоэлектриков», «Кинетика фазовых превращений» и «Кинетика доменной структуры сегнетоэлектриков» для студентов физического факультета.

4. Список статей, опубликованных и принятых в печать по результатам исследований третьего этапа.

1. П.С. Зеленовский, В.Я. Шур, Д.К. Кузнецов, Е.А. Мингалиев, М. Fontana, P. Bourson, Визуализация нанодоменов в монокристаллах ниобата лития методом сканирующей лазерной конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния, ФТТ, 2011, Т.53, №1, С.106-109.
P. S. Zelenovskiy, V. Ya. Shur, D. K. Kuznetsov, E. A. Mingaliev, M. Fontana, and P. Bourson, Visualization of Nanodomains in Lithium Niobate Single Crystals by Scanning Laser Confocal Raman Microscopy, Physics of the Solid State, 2011, Vol. 53, No. 1, pp. 109–113.
2. E.A. Eliseev, A.N. Morozovska, G.S. Svechnikov, Venkatraman Gopalan and V.Ya. Shur, Static conductivity of charged domain wall in uniaxial ferroelectric-semiconductors, Phys. Rev. B, 2011, **83**, 235313.

3. V.Ya. Shur, D.K. Kuznetsov, E.A. Mingaliev, E.M. Yakunina, A.I. Lobov, and A.V. Ievlev, In situ Investigation of Formation of Self-assembled Nanodomain Structure in Lithium Niobate after Pulse Laser Irradiation, Appl. Phys. Lett. 2011 (in press).
4. V.Ya. Shur, M.S. Nebogatikov, D.O. Alikin, P.S. Zelenovskiy, M.F. Sarmanova, A.V. Ievlev, E.A. Mingaliev, D.K. Kuznetsov, Investigation of the Nanodomain Structure Formation by Piezoelectric Force Microscopy and Raman Confocal Microscopy in LiNbO_3 and LiTaO_3 Crystals, J. Appl. Phys. 2011 (in press).
5. V.Ya. Shur, A.V. Ievlev, E.V. Nikolaeva, E.I. Shishkin, and M.M. Neradovskiy, Influence of Adsorbed Surface Layer on Domain Growth in the Field Produced by Conductive Tip of Scanning Probe Microscope in Lithium Niobate, J. Appl. Phys. 2011 (in press).

4.1. Заключение экспертной комиссии по открытому опубликованию статей прилагаются;

4.2. Копии статей, опубликованных в ФТТ и в Phys. Rev. В прилагаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью работы является развитие методов доменной инженерии для формирования прецизионных периодических микро- и нанодоменных структур в сегнетоэлектриках и разработка на их основе преобразователей длины волны лазерного излучения.

В результате теоретических и экспериментальных исследований на отчетном этапе работы получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ современного состояния научно-технической информации, связанной с разработкой преобразователей длины волны лазерного излучения на основе кристаллов ниобата лития и танталата лития с периодической доменной структурой. Сформулированы требуемые функциональные характеристики нелинейно-оптических преобразователей длины волны лазерного излучения для существующей и перспективной элементной базы современного приборостроения.

2. Созданы автоматизированная установка и программное обеспечение для проведения измерений основных характеристик элементов для преобразования длины волны лазерного излучения. Разработаны и апробированы методики измерения основных характеристик преобразователей: пространственной однородности эффективности преобразования и температуры синхронизма.

3. Изготовлены два экспериментальных макета преобразователей длины волны лазерного излучения и измерены их основные характеристики. На основе установленного влияния условий формирования доменной структуры на основные рабочие характеристики преобразователей доработаны технологические приемы.

4. Проведен анализ и систематизация полученных результатов по созданию доменной структуры приложением электрического поля с использованием импульсного лазерного облучения и быстрого нагрева. Детальное исследование формирования микро- и нанодоменных структур под действием пироэлектрического поля при охлаждении после неоднородного импульсного нагрева позволило заложить основы для создания технологий изготовления регулярных нанодоменных структур.

5. Проведен анализ возможностей применения периодических доменных структур и определена оптимальная номенклатура нелинейно-оптических преобразователей длины волны излучения с периодической доменной структурой для построения приборов на новых физических принципах.

6. Разработаны и представлены рекомендации по возможности использования результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики.

7. Представлены рекомендации по использованию результатов НИР при разработке научно-образовательных курсов.

8. По результатам исследований третьего этапа: 1) защищена диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук, 2) представлена к защите диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук, 3) защищены 6 дипломных работ, 4) опубликованы 2 статьи, 5) приняты в печать 3 статьи, 6) представлено 26 докладов на 4х конференциях – двух международных и двух Всероссийских.

Все поставленные задачи решены в полном объеме, что позволило достигнуть цели третьего этапа проекта.

В выполнении проекта участвовало 5 молодых кандидатов наук, 7 аспирантов и 8 студентов.

Полученные результаты обладают мировой новизной. Они представляют значительный интерес для развития методов доменной инженерии при создании периодических и квазипериодических доменных структур при изготовлении нелинейно-оптических элементов, используемых для изменения частоты лазерного излучения.

Разрабатываемая технология обладает существенными преимуществами перед аналогами, поскольку открывает возможности для прецизионного контроля формы и размеров полосовых доменов в периодической доменной структуре. В частности, использование новой технологии позволяет уменьшать период структур, вплоть до перехода к субмикронным периодам, что принципиально невозможно при использовании известных технологий.

Технология формирования периодических доменных структур в LN позволит создать преобразователи частоты излучения для источников видимого света, используемых в проекционном телевидении, формировании цифровых изображений, медицине, полупроводниковом производстве и хранении данных. Результаты могут быть использованы предприятиями, производящими лазеры и лазерную технику различного назначения.

Результаты могут быть использованы в следующих приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники в Российской Федерации “Индустрия наносистем и материалов” и критическим технологиям Российской Федерации: “Нанотехнологии и наноматериалы”.

Сведения из аналитического обзора и полученные оригинальные научные результаты будут включены в программы специальных учебных курсов. Полученные лабораторные образцы в дальнейшем могут быть использованы в качестве пособий для проведения практикумов по сканирующей зондовой микроскопии для студентов физического и химического факультетов УрФУ.

Список использованных источников

- [1] W.P. Risk, T.R. Gosnell, and A.V. Nurmikko. *Compact Blue-Green Lasers*, Cambridge University Press, 2003.
- [2] D. Hum and M. Fejer. Quasi-phasematching // *Comptes Rendus Physique*. - 2007. - V. 8. - pp. 180-198.
- [3] G.D. Miller, R.G. Batchko, W.M. Tulloch, D.R. Weise, M.M. Fejer, and R.L. Byer. 42%-efficient single-pass cw second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate // *Optics Letters*. - 1997. - V. 22. - p. 1834.
- [4] J. Wang, J. Sun, J.R. Kurz, and M.M. Fejer. Tunable Wavelength Conversion of ps-Pulses Exploiting Cascaded Sum- and Difference Frequency Generation in a PPLN-Fiber Ring Laser // *IEEE Photonics Technology Letters*. - 2006. - V. 18. - pp. 2093-2095.
- [5] M. Charbonneau-lefort, B. Afeyan, and M.M. Fejer. Optical parametric amplifiers using chirped quasi- phase-matching gratings. II. Space-time evolution of light pulses // *Journal Optical Society of America B*. - 2008. - V. 25. - pp. 680-697.
- [6] M. Charbonneau-lefort, B. Afeyan, and M.M. Fejer. Optical parametric amplifiers using chirped quasi- phase-matching gratings I: practical design formulas // *Journal Optical Society of America B*. - 2008. - V. 25. - pp. 463-480.
- [7] R.W. Boyd. *Nonlinear Optics, Third Edition*, Academic Press, 2007.
- [8] M.M. Fejer, G.A. Magel, D.H. Jundt, and R.L. Byer. Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation : Tuning and Tolerances // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. - 1992. - V. 28. - pp. 2631-2654.
- [9] U. Schlarb and K. Betzler. Influence of the defect structure on the refractive indices of undoped and Mg-doped lithium niobate // *Physical Review B*. - 1994. - V. 50. - pp. 751-757.
- [10] H. Li, D. Tang, S. Ng, and J. Kong. Temperature-tunable nanosecond optical parametric oscillator based on periodically poled // *Optics & Laser Technology*. - 2006. - V. 38. - pp. 192-195.
- [11] D.H. Jundt. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction n_e in congruent lithium niobate // *Optics Letters*. - 1997. - V. 22. - pp. 1553-1555.
- [12] D.-long Zhang, Q.-zhong Yang, P.-rang Hua, H.-li Liu, Y.-ming Cui, L. Sun, Y.-heng Xu, and E.Y.-bun Pun. Sellmeier equation for doubly Er / Mg-doped congruent LiNbO_3 crystals // *Journal Optical Society of America B*. - 2009. - V. 26. - pp. 620-626.
- [13] D.E. Zelmon, D.L. Small, and D.H. Jundt. Infrared corrected Sellmeier coefficients for congruently grown lithium niobate and 5 mol. % magnesium oxide – doped lithium niobate // *Journal Optical Society of America B*. - 1997. - V. 14. - pp. 3319-3322.
- [14] X. Zhang, B. Yao, Y. Wang, Y. Ju, and Y. Zhang. Middle-infrared intracavity periodically poled $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ optical parametric oscillator // *Chinese Optics Letters*. - 2007. - V. 5. - pp. 426-427.
- [15] O. Gayer, Z. Sacks, E. Galun, and A. Arie. Temperature and wavelength dependent refractive index equations for MgO-doped congruent and stoichiometric LiNbO_3 // *Applied Physics B*. - 2008. - V. 91. - pp. 343-348.

- [16] O. Paul, A. Quosig, T. Bauer, M. Nittmann, J. Bartschke, G. Anstett, and J. a L'huillier. Temperature-dependent Sellmeier equation in the MIR for the extraordinary refractive index of 5% MgO doped congruent LiNbO₃ // *Applied Physics B*. - 2006. - V. 86. - pp. 111-115.
- [17] H.Y. Shen, H. Xu, Z.D. Zeng, W.X. Lin, R.F. Wu, and G.F. Xu. Measurement of refractive indices and thermal refractive-index coefficients of LiNbO₃ crystal doped with 5 mol. % MgO // *Applied Optics*. - 1992. - V. 31. - pp. 6695-6697.
- [18] J. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing, and P. Pershan. Interactions between Light Waves in a Nonlinear Dielectric // *Physical Review*. - 1962. - V. 127. - pp. 1918-1939.
- [19] F. Jermann, M. Simon, and E. Krätzig. Photorefractive properties of congruent and stoichiometric lithium niobate at high light intensities // *Journal of the Optical Society of America B*. - 1995. - V. 12. - p. 2066.
- [20] Y. Furukawa, K. Kitamura, A. Alexandrovski, R.K. Route, M.M. Fejer, and G. Foulon. Green-induced infrared absorption in MgO doped LiNbO₃ // *Applied Physics Letters*. - 2001. - V. 78. - p. 1970.
- [21] F. Nitanda, Y. Furukawa, S. Makio, M. Sato, and K. Ito. Increased Optical Damage Resistance and Transparency in MgO-Doped LiTaO₃ Single Crystals // *Japanese Journal of Applied Physics*. - 1995. - V. 34. - pp. 1546-1549.
- [22] Y. Furukawa, K. Kitamura, S. Takekawa, K. Niwa, and H. Hatano. Stoichiometric Mg:LiNbO₃ as an effective material for nonlinear optics // *Optics Letters*. - 1998. - V. 23. - p. 1892.
- [23] P. Even. *High-power double-clad fiber lasers: a review*, SPIE, 2002.
- [24] T. Liu, Y.H. Wang, R. Dumke, A. Stejskal, Y.N. Zhao, J. Zhang, Z.H. Lu, L.J. Wang, T. Becker, and H. Walther. Narrow linewidth light source for an ultraviolet optical frequency standard // *Applied Physics B*. - 2007. - V. 87. - pp. 227-232.
- [25] D. Georgiev, V.P. Gapontsev, A.G. Dronov, M.Y. Vyatkin, A.B. Rulkov, S.V. Popov, and J.R. Taylor. Watts-level frequency doubling of a narrow line linearly polarized Raman fiber laser to 589 nm // *Optics Express*. - 2005. - V. 13. - pp. 6772-6776.
- [26] S. Sinha, C. Langrock, M. Dignonnet, M.M. Fejer, and R.L. Byer. Efficient yellow-light generation by frequency doubling a narrow-linewidth 1150 nm ytterbium fiber oscillator // *Optics Letters*. - 2006. - V. 31. - pp. 347-349.
- [27] H. Furuya, A. Morikawa, K. Mizuuchi, and K. Yamamoto. High-Beam-Quality Continuous Wave 3 W Green-Light Generation in Bulk Periodically Poled MgO:LiNbO₃ // *Japanese Journal of Applied Physics*. - 2006. - V. 45. - pp. 6704-6707.
- [28] S.V. Tovstonog, S. Kurimura, and K. Kitamura. Continuous-wave 2 W green light generation in periodically poled Mg-doped stoichiometric lithium tantalate // *Japanese Journal Of Applied Physics Part 2-Letters \ Express Letters*. - 2006. - V. 45. - p. L907--L909.
- [29] S.V. Tovstonog, S. Kurimura, I. Suzuki, K. Takeno, S. Moriwaki, N. Ohmae, N. Mio, and T. Katagai. Thermal effects in high-power CW second harmonic generation in Mg-doped stoichiometric lithium tantalate // *Opt. Express*. - 2008. - V. 16. - pp. 11294-11299.

- [30] F.J. Kontur, I. Dajani, Y. Lu, and R.J. Knize. Frequency-doubling of a CW fiber laser using PPKTP, PPMgSLT, and PPMgLN // *Optics Express*. - 2007. - V. 15. - pp. 12882-12889.
- [31] V.A. Akulov, D.M. Afanasiev, S.A. Babin, D.V. Churkin, S.I. Kablukov, M.A. Rybakov, and A.A. Vlasov. Frequency tuning and doubling in Yb-doped fiber lasers // *Laser Physics*. - 2007. - V. 17. - pp. 124-129.
- [32] G.K. Samanta, S.C. Kumar, M. Mathew, C. Canalias, V. Pasiskevicius, F. Laurell, and M. Ebrahim-Zadeh. High-power, continuous-wave, second-harmonic generation at 532 nm in periodically poled KTiOPO₄ // *Optics Letters*. - 2008. - V. 33. - pp. 2955-2957.
- [33] G.K. Samanta, S.C. Kumar, K. Devi, and M. Ebrahim-Zadeh. Multicrystal, continuous-wave, single-pass second-harmonic generation with 56% efficiency // *Optics Letters*. - 2010. - V. 35. - p. 3513.
- [34] S.C. Kumar, G.K. Samanta, K. Devi, and M. Ebrahim-Zadeh. High-efficiency, multicrystal, single-pass, continuous-wave second harmonic generation // *Optics Express*. - 2011. - V. 19. - p. 11152.
- [35] Lobov A.I., Shur V.Ya., Kuznetsov D.K., Negashev S.A., Pelegov D.V., Shishkin E.I., Zelenovskiy P.S. Discrete switching by growth of nano-scale domain rays under highly nonequilibrium conditions in lithium niobate single crystals // *Ferroelectrics*. - 2008. - V. 373. - P. 99-108.
- [36] Shur V.Ya., Kuznetsov D.K., Lobov A.I., Nikolaeva E.V., Dolbilov M.A., Orlov A.N., Osipov V.V., Formation of self-similar surface nano-domain structures in lithium niobate under highly nonequilibrium conditions // *Ferroelectrics*. - 2006. - V. 341. - P. 85-93.
- [37] Shur V.Ya., Rumyantsev E.L., Nikolaeva E.V., Shishkin E.I., Fast and superfast motion of ferroelectric domain boundaries // *Integrated Ferroelectrics*. - 2003. - V. 59. - P. 1493-1503.
- [38] Shen, H. Y., H. Xu, Z. D. Zeng, W. X. Lin, R. F. Wu, and G. F. Xu. Measurement of Refractive Indices and Thermal Refractive-Index Coefficients of Linbo3 Crystal Doped With 5 Mol. % Mgo. // *Appl. Opt.* - 1992. - V.31. - P. 6695-6697.
- [39] Paul, O., A. Quosig, T. Bauer, M. Nittmann, J. Bartschke, G. Anstett, and J. A. Lahuillier. Temperature-Dependent Sellmeier Equation in the Mir for the Extraordinary Refractive Index of 5% Mgo Doped Congruent Linbo3. // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. - 2007. - V. 86. P. - 111-115.
- [40] Gayer, O., Z. Sacks, E. Galun, and A. Arie. Temperature and Wavelength Dependent Refractive Index Equations for Mgo-Doped Congruent and Stoichiometric Linbo3. // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. - 2008. - V. 91. - P. 343-348.
- [41] Zelmon, David E., David L. Small, and Dieter Jundt. Infrared Corrected Sellmeier Coefficients for Congruently Grown Lithium Niobate and 5 Mol.% Magnesium Oxide -- doped Lithium Niobate. // *J. Opt. Soc. Am. B*. 0 1997. - V. 14. - P. 3319-3322.
- [42] Zhang, De-Long, Qing-Zhong Yang, Ping-Rang Hua, Hong-Li Liu, Yu-Ming Cui, Liang Sun, X. u. Yu-Heng, and Edwin Yue-Bun Pun. Sellmeier Equation for Doubly Er/mg-Doped Congruent Linbo3 Crystals. // *J. Opt. Soc. Am. B*. - 2009. - V. 26. - P. 620-626.
- [43] Schlarb, U., and K. Betzler. Influence of the Defect Structure on the Refractive Indices of Undoped and Mg-Doped Lithium Niobate. // *Physical Review B*. - 1994. - V. 50. - 751-757.